

Análisis comparativo de diferentes topologías de convertidores buck-boost utilizando MatLab

ANÁLISIS COMPARATIVO DE DIFERENTES TOPOLOGÍAS DE CONVERTIDORES BUCK-BOOST
UTILIZANDO MATLAB

JEISSON ANDRES RIVERA YEPES

EMANUEL DAVID CARDONA ISAZA

Universidad Tecnológica de Pereira

Facultad de Ingenierías

Programa de Ingeniería Eléctrica

Pereira

Junio de 2018

Análisis comparativo de diferentes topologías de convertidores buck-boost utilizando MatLab

ANÁLISIS COMPARATIVO DE DIFERENTES TOPOLOGÍAS DE CONVERTIDORES BUCK-BOOST
UTILIZANDO MATLAB

JEISSON ANDRES RIVERA YEPES

EMANUEL DAVID CARDONA ISAZA

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electricista

Director

M.SC. DUBERNEY MURILLO YARCE.

Universidad Tecnológica de Pereira

Facultad de Ingenierías

Programa de Ingeniería Eléctrica

Pereira

Junio 2018

Dedicación

Agradezco a Dios y a la vida por permitirme culminar esta etapa tan importante en mi vida, a pesar de todas las adversidades. A Juan Manuel, mi hijo, mi bendición, quien siempre fue mi motivación para salir adelante en mi carrera, a mis padres, quienes siempre estuvieron alentándome durante todo este proceso de formación, y a mi hermana, Nataly, quien siempre ha velado por mi bienestar, y por último quiero agradecer a todos aquellos profesores que me enseñaron a ser una mejor persona, y que además me inculcaron amor y gusto por mi carrera.

JEISSON ANDRES RIVERA Y.

A Dios, porque Él está en todas las áreas de mi vida acompañándome y guiándome, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad, por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo por rodearme de personas maravillosas que me llenan de alegría. (Familia y amigos).

A mi familia, por su apoyo y paciencia, especialmente el de mi madre que con su ejemplo y buenos valores infundados que me permitieron convertirme en la persona que soy. ¡¡Gracias madre!!

A mi novia Erika, por ser una parte importante de mi vida, por su paciencia y amor incondicional.

A mi gran amigo Oscar, él y su familia han estado presentes en los mejores y peores momentos, brindándome su apoyo incondicional y ofreciéndome algo realmente importante, una verdadera amistad.

EMANUEL DAVID CARDONA I.

Agradecimientos

Agradecemos a nuestros padres y familiares por que nos brindaron su apoyo tanto moral y económicamente para seguir estudiando y lograr el objetivo trazado para un futuro mejor y ser orgullo para ellos y de toda la familia.

Gracia a todas las personas de la UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA, alma mater de nuestra educación, por su atención y amabilidad en todo lo referente a nuestro proceso como alumno de pregrado en la facultad de ingenierías y el programa de INGENIERÍA ELÉCTRICA.

De igual manera agradecemos a todos los maestros que influyeron de manera positiva en nuestra formación como profesionales, brindando no solo los conceptos necesarios para enfrentar el campo laboral, sino también por el respeto y amor por la profesión.

Gracias de corazón, a nuestro tutor DUBERNEY MURILLO YARCE. Gracias por su paciencia, dedicación, criterio y aliento.

Agradecemos especialmente a CLARA INES ORTEGA secretaria de la facultad de ingeniería eléctrica. Gracias por su gestión y apoyo incondicional hacia nosotros los estudiantes.

Introducción

Los convertidores de potencia se clasifican en cuatro grupos de acuerdo a la transformación de la señal de energía eléctrica: DC-AC, AC-DC, AC-AC, DC-DC. El convertidor DC-AC también conocido como inversor, convierte el voltaje de entrada de corriente directa (DC) a un voltaje de salida de corriente alterna (AC) con amplitud y frecuencia variable. El objetivo del convertidor AC-DC es obtener una tensión de salida DC a partir de una tensión AC. El convertidor AC-AC, conocido también como convertidor de corriente alterna permite modificar la amplitud y la frecuencia de la señal de entrada. Por último, el convertidor DC-DC transforma un nivel de tensión DC a un nivel de tensión diferente en DC.

En los convertidores DC-DC existen configuraciones básicas ampliamente estudiadas como lo son las topologías: buck, flyback, sepic, forward, boost, buck y buck-boost. La topología buck-boost permite reducir o elevar la tensión DC de entrada siendo útil en aplicaciones como carga y descarga de baterías, redes HVDC y reguladores de tensión en elementos electrónicos.

La topología básica del convertidor buck-boost está compuesta de dos elementos almacenadores de energía (inductor, capacitor), un dispositivo de conmutación (IGBT, MOSFET), un diodo, una carga resistiva y una fuente DC. Sin embargo, en la literatura, aparecen dentro de la familia buck-boost un sin número de configuraciones diferentes que guardan relación con la topología básica.

Objetivos

Objetivo general

Realizar un análisis comparativo de las principales topologías de convertidores buck-boost estudiadas en la literatura utilizando MATLAB/simulink.

Objetivos específicos

- Hacer una revisión del estado del arte en convertidores buck-boost en la literatura especializada.
- Clasificar los convertidores buck-boost por familias a partir de características comunes.
- Simular las principales topologías de convertidores buck-boost en MATLAB/simulink.
- Analizar resultados de las simulaciones realizadas.
- Realizar la comparación de las topologías estudiadas.

Análisis comparativo de diferentes topologías de convertidores buck-boost utilizando MatLab

Contenido

Introducción	5
Objetivos	5
Capítulo 1	1
1. Introducción y conceptos generales	1
1.1 La electrónica de potencia	1
1.2 Historia de la electrónica de potencia.....	1
1.3 Semiconductores de potencia.....	2
1.4 Elementos ideales.....	3
1.4.1 Semiconductores.....	3
1.4.2 Elementos pasivos	3
1.4.3 Transformador ideal	3
1.5 Convertidores de Potencia	4
1.6 Análisis convertidores buck-boost	4
1.6.1 Estados de operación	4
1.6.2 Balance de potencias.....	5
1.6.3 Modo continuo y discontinuo de los convertidores.....	5
1.6.4 Metodología para hallar la ganancia de voltaje	6
1.6.5 Metodología para el análisis de cargabilidad	7
1.7 Convertidor buck-boost básico	8
Capítulo 2	11
2. Clasificación de familias buck-boost.....	11
2.1 Convertidores buck-boost	11
2.2 Familia de convertidores buck-boost de un interruptor	11
2.2.1 Convertidor buck-boost de un interruptor tipo 1	11
2.2.2 Convertidor buck-boost de un interruptor tipo 2	14
2.3 Familia de convertidores buck-boost con acoplamiento magnético.	15
2.3.1 Convertidor buck-boost con acoplamiento magnético tipo 1	15
2.3.2 Convertidor buck-boost con acoplamiento magnético tipo 2	18
2.4 Familia de convertidores buck-boost de dos interruptores.....	19
2.4.1 Convertidor buck-boost de dos interruptores tipo 1	19

Análisis comparativo de diferentes topologías de convertidores buck-boost utilizando MatLab

2.4.2 Convertidor buck-boost de dos interruptores tipo 2	22
2.5 Familia de convertidores buck-boost de cuatro interruptores.	22
2.5.1 Convertidor buck-boost de cuatro interruptores tipo 1	22
2.5.2 Convertidor buck-boost de cuatro interruptores tipo 2	26
2.6 Familia de convertidores buck-boost KY	28
2.6.1 Convertidor buck-boost KY tipo 1	28
2.6.2 Convertidor buck-boost KY tipo 2	30
2.7 Familia de convertidores buck-boost cuadráticos	31
2.7.1 Convertidor buck-boost cuadrático tipo 1	31
2.7.2 Convertidor buck-boost cuadrático tipo 2	34
2.8 Familia de convertidores buck-boost bidireccionales	35
2.8.1 Convertidor buck-boost bidireccional tipo 1	35
2.8.2. Convertidor buck-boost bidireccional tipo 2	40
2.9. Familia de convertidores ZVT	42
2.9.1. Convertidor buck-boost ZVT tipo 1	42
2.9.2 Convertidor buck-boost ZVT tipo 2	44
2.10. Familia de convertidores buck-boost aislados	45
2.10.1 Convertidor buck-boost aislado tipo 1	45
2.10.2 Convertidor buck-boost aislado tipo 2	48
2.11 Resumen de topologías buck-boost	49
2.11.1. Análisis de ganancia de voltaje	51
2.11.2. Análisis de cargabilidad	53
2.11.3. Descripción de convertidores buck-boost	56
Capitulo 3	64
3. Simulaciones y comparaciones	64
3.1 Software	64
3.2 Criterios de simulación	66
3.2.1 Definición de parámetros	67
3.2.2 Resumen de parámetros de simulación	74
3.3 Resultados de simulación	76
Conclusiones	83
Trabajos futuros	85

Referencias.....	86
------------------	----

Fig. 1.1. Señal de conmutación para el convertidor buck-boost de un solo interruptor	5
Fig. 1.2 Cuadripolo.....	5
Fig. 1.3 Corriente en el inductor en modo continuo	6
Fig. 1.4 Corriente en el inductor en modo discontinuo	6
Fig. 1.5 Convertidor buck-boost clásico	8
Fig. 1.6 Convertidor buck-boost clásico con S=on.....	9
Fig. 1.7 Convertidor buck-boost clásico con S=off.	9
Fig. 1.8 Gráfica de ganancia de voltaje del convertidor buck-boost clásico	10
Fig. 2.1 Convertidor buck-boost de un interruptor tipo 1.....	12
Fig. 2.2 Convertidor buck-boost de un interruptor con S=on	12
Fig. 2.3 Convertidor de un interruptor con S=off.....	13
Fig. 2.4 Convertidor buck-boost de un interruptor tipo 2.....	15
Fig. 2.5 Convertidor buck-boost con acoplamiento magnético	16
Fig. 2.6 Inductor equivalente.....	16
Fig. 2.7 Convertidor buck-boost con acoplamiento magnético con S=on	17
Fig. 2.8 Convertidor buck-boost con acoplamiento magnético con S=off	17
Fig. 2.9 Convertidor buck-boost con acoplamiento tipo 2.....	18
Fig. 2.10 Convertidor buck-boost en cascada de dos interruptores	19
Fig. 2.11 Convertidor buck-boost de dos interruptores.....	20
Fig. 2.12 Convertidor buck-boost de dos interruptores con S=on	20
Fig. 2.13 Convertidor buck-boost de dos interruptores con S=off.....	21
Fig. 2.14 Convertidor buck-boost de dos interruptores tipo 2.....	22
Fig. 2.15 Convertidor buck-boost de cuatro interruptores tipo 1.....	23
Fig. 2.16 Convertidor buck-boost de cuatro interruptores en estado buck.....	23
Fig. 2.17 Convertidor buck-boost de cuatro interruptores en estado boost	25
Fig. 2.18 Convertidor buck-boost de cuatro interruptores tipo 2.....	27
Fig. 2.19 Convertidor buck-boost KY tipo 1.....	28
Fig. 2.20 Convertidor buck-boost KY con S1=on y S2=off	29
Fig. 2.21 Convertidor buck-boost KY con S1=off y S2=on	29
Fig. 2.22 Convertidor buck-boost KY tipo 2.....	31
Fig. 2.23 Convertidor buck-boost cuadrático tipo 1.....	32
Fig. 2.24 Convertidor buck-boost cuadrático con S1=on S2=on	32
Fig. 2.25 Convertidor buck-boost cuadrático con S1=off S2=off.....	33
Fig. 2.26 Convertidor buck-boost cuadrático tipo 2.....	34
Fig. 2.27 Esquema de funcionamiento del convertidor buck-boost bidireccional.....	35
Fig. 2.28 Convertidor buck-boost bidireccional tipo 1	36
Fig. 2.29 Convertidor buck-boost bidireccional operando en modo buck.....	36
Fig. 2.30 Convertidor buck-boost bidireccional operando en modo buck con S1=on-S2=off	37
Fig. 2.31 Convertidor buck-boost bidireccional operando en modo buck con S1=off S2=on.....	37

Fig. 2.32 Convertidor buck-boost bidireccional operando en modo boost	38
Fig. 2.33 Convertidor buck-boost bidireccional operando en modo boost con S1=off S2=on	39
Fig. 2.34 Convertidor buck-boost bidireccional tipo 2	41
Fig. 2.35 Convertidor buck-boost ZVT tipo 1.....	42
Fig. 2.36 Convertidor buck-boost ZVT con S1=on y S2=on.....	43
Fig. 2.37 Convertidor buck-boost ZVT con S1=off y S2=off	43
Fig. 2.38 Convertidor buck-boost ZVT tipo 2.....	45
Fig. 2.39 Convertidor buck-boost aislado tipo 1	46
Fig. 2.40 Convertidor buck-boost aislado con S=on	47
Fig. 2.41 Convertidor buck-boost aislado con S=off.....	47
Fig. 2.42 Convertidor buck-boost aislado tipo 2	49
<i>Fig. 2.43 Ganancia de voltaje en convertidores buck-boost. (a) convertidor cuadrático tipo 1 y tipo 2. (b) Convertidor KY tipo 1 y tipo 2. (c) Convertidor de un solo interruptor clásico, con acoplamiento magnético tipo 1, ZVT tipo 1, aislado tipo 1. (d) convertidor con acoplamiento magnético tipo 2, de dos interruptores tipo 1 y tipo 2, un interruptor tipo 2. Aislado tipo 2 un interruptor tipo 2. (e) convertidor de un interruptor tipo 1. (f) convertidor de cuatro interruptores tipo 1 y tipo 2, bidireccional tipo 1 y tipo 2, ZVT tipo 2.</i>	53
Fig. 2.44 Cargabilidad de convertidores buck-boost.....	56
Fig. 3.1 Interfaz principal de Simulink	64
Fig. 3.2 Sub-librerías de Specialized Tecnology.....	65
Fig. 3.3Circuito buck-boost clásico simulado en Simulink.....	66
Fig. 3.4 Convertidor buck-boost clásico	67
Fig. 3.5 Convertidor buck-boost de un interruptor tipo 1.....	68
Fig. 3.6 Convertidor buck-boost de un interruptor tipo 2.....	68
Fig. 3.7 Convertidor buck-boost con acoplamiento magnetico tipo 1	69
Fig. 3.8 Convertidor buck-boost con acoplamiento magnético tipo 2.....	69
Fig. 3.9 Convertidor buck-boost de dos interruptores tipo 1.....	69
Fig. 3.10 Convertidor buck-boost de dos interruptores tipo 2.	70
Fig. 3.11 Convertidor buck-boost de cuatro interruptores tipo 1.....	70
Fig. 3.12 Convertidor buck-boost de cuatro interruptores tipo 2.....	70
Fig. 3.13 Convertidor buck-boost KY tipo 1.....	71
Fig. 3.14 Convertidor buck-boost KY tipo 2.....	71
Fig. 3.15 Convertidor buck-boost cuadrático tipo 1.....	71
Fig. 3.16 Convertidor buck-boost cuadrático tipo 2.....	72
Fig. 3.17 Convertidor buck-boost bidireccional tipo 1 (modo boost)	72
Fig. 3.18 Convertidor buck-boost bidireccional tipo 1 (modo buck).....	72
Fig. 3.19 Convertidor buck-boost bidireccional tipo 2 (modo boost)	73
Fig. 3.20 Convertidor buck-boost bidireccional tipo 2 (modo buck).....	73
Fig. 3.21 Convertidor buck-boost ZVT tipo 1.....	73
Fig. 3.22 Convertidor buck-boost ZVT tipo 2.....	74
Fig. 3.23 Convertidor buck-boost con aislamiento tipo 1	74
Fig. 3.24 Convertidor buck-boost con aislamiento tipo 2	74

Análisis comparativo de diferentes topologías de convertidores buck-boost utilizando MatLab

Fig. 3.25 Voltaje en la carga del convertidor buck-boost clásico	76
Fig. 3.26 Voltaje en la carga del convertidor buck-boost de un interruptor tipo 1	76
Fig. 3.27 Voltaje en la carga del convertidor buck-boost de un interruptor tipo 2	77
Fig. 3.28 . Voltaje en la carga del convertidor buck-boost con acoplamiento magnético tipo 1.....	77
Fig. 3.29 Voltaje en la carga del convertidor buck-boost con acoplamiento magnético tipo 2.....	78
Fig. 3.30 Voltaje en la carga del convertidor buck-boost de dos interruptores tipo 1	78
Fig. 3.31 Voltaje en la carga del convertidor buck-boost de dos interruptores tipo 2	79
Fig. 3.32 Voltaje en la carga del convertidor buck-boost de cuatro interruptores tipo 1.....	79
Fig. 3.33 Voltaje en la carga del convertidor buck-boost de cuatro interruptores tipo 2.....	79
Fig. 3.34 Voltaje en la carga del convertidor buck-boost KY tipo 1.....	80
Fig. 3.35 Voltaje en la carga del convertidor buck-boost KY tipo 2.....	80
Fig. 3.36 Voltaje en la carga del convertidor buck-boost cuadrático tipo 1.....	81
Fig. 3.37 Voltaje en la carga del convertidor buck-boost cuadrático tipo 2.....	81
Fig. 3.38 Voltaje en la carga del convertidor buck-boost bidireccional tipo 1.....	81
Fig. 3.39 Voltaje en la carga del convertidor buck-boost bidireccional tipo 2	82
Fig. 3.40 Voltaje en la carga del convertidor buck-boost ZVT tipo 1.....	82
Fig. 3.41 Voltaje en la carga del convertidor buck-boost ZVT tipo 2.....	83
Fig. 3.42 Voltaje en la carga del convertidor buck-boost aislado tipo 1	83
Fig. 3.43 Voltaje en la carga del convertidor buck-boost aislado tipo 2	83
Tabla 1.1 Rango de potencia semiconductores. [1]	2
Tabla 1.2 Principales características de semiconductores [1].....	2
Tabla 2.1 Esquema de funcionamiento del convertidor buck-boost de cuatro interruptores	26
Tabla 2.2 Esquema de control del convertidor bidireccional.....	35
Tabla 2.3 Resumen de topologías buck-boost	51
Tabla 2.4 Análisis de ganancia de voltaje de convertidores buck-boost.....	52
Tabla 2.5 Análisis de cargabilidad en convertidores buck-boost	55
Tabla 2.6 Características de convertidores buck-boost	61
Tabla 2.7 Aplicaciones de las topologías de convertidores buck-boost.....	63
Tabla 3.1 Elementos y librerías necesarias para la implementación en Simulink/Matlab de los convertidores buck-boost.	66
Tabla 3.2 Resumen de parámetros de simulación	76

Título:

ANÁLISIS COMPARATIVO DE DIFERENTES TOPOLOGÍAS DE CONVERTIDORES BUCK-BOOST UTILIZANDO MATLAB

Resumen

En este proyecto de investigación se realizó un análisis comparativo de diferentes topologías buck-boost en estado estacionario bajo condiciones ideales y en lazo abierto. Las variables de comparación consideradas fueron ganancia de voltaje y cargabilidad. Para el análisis de las topologías se utilizó el software Matlab/Simulink.

Se estudiaron diferentes convertidores buck-boost presentes en la literatura, analizando dos características principales: ganancia de voltaje y cargabilidad. En total se analizaron 18 topologías clasificadas en 9 familias, que son una selección de las topologías halladas en la revisión del estado del arte. Esta clasificación por familias es propia de los autores y se tuvo en cuenta características como: número de interruptores, dirección del flujo de potencia, aislamiento, acoplamiento magnético, elementos almacenadores de energía, ganancia de voltaje, características constructivas y operacionales. Así, se conformaron las siguientes familias: Un interruptor tipo 1 y tipo 2, acoplamiento magnético tipo 1 y tipo 2, dos interruptores tipo 1 y tipo 2, cuatro interruptores tipo 1 y tipo 2, KY tipo 1 y tipo 2, cuadráticos tipo 1 y tipo 2, bidireccional tipo 1 y tipo 2, ZVT tipo 1 y tipo 2, y aislados tipo 1 y tipo 2.

Mediante el análisis de las topologías y resultados de simulación, se evidencia que algunos convertidores presentan altas ganancias de voltaje, siendo el convertidor Buck-Boost de un solo interruptor tipo 1 el que presenta la mayor ganancia, seguido por las familias de convertidores cuadráticos, bidireccionales y ZVT tipo 2.

La cargabilidad de los convertidores buck-boost depende de dos factores fundamentales: ganancia de voltaje y número de inductores. También es importante mencionar que la cargabilidad es inversamente proporcional al ciclo de trabajo. Los resultados concluyen que el convertidor Buck-Boost acoplado tipo 2 es el que presenta la mayor cargabilidad. También están aquellos convertidores que tienen altas cargabilidades, pero su cargabilidad no depende del ciclo de trabajo, como son las familias bidireccional, de cuatro interruptores tipo 1, y ZVT tipo 2.

Capítulo 1

En este capítulo se hará una breve descripción de la electrónica de potencia y su amplia gama de aplicaciones. Además de lo anterior se pretende explicar el funcionamiento de los convertidores de potencia haciendo énfasis en los convertidores buck-boost, ya que en ellos se centra el estudio que se realiza en este documento.

1. Introducción y conceptos generales

1.1 La electrónica de potencia

La electrónica de potencia (EP) es una rama de la ingeniería eléctrica que se ocupa de la conversión y control de la energía eléctrica en aplicaciones tan diversas como calefacción, iluminación, fuentes de alimentación reguladas, calentamiento por inducción, accionamientos de máquinas eléctricas, soldadura, compensación estática de reactivos, energías renovables, satélites, vehículos eléctricos, transporte de energía en corriente continua, entre otras.

En el sistema eléctrico se genera, transmite y distribuye energía a una frecuencia fija (50 o 60 Hz), y se entrega un voltaje de referencia constante al usuario final. Sin embargo, en algunos casos las características de la señal eléctrica en el punto de conexión del usuario no son las que se requieren para el desarrollo de las aplicaciones. Entonces, es necesario la transformación de las señales de alimentación de la red de suministro de energía mediante circuitos de electrónica de potencia.

La EP es el resultado del desarrollo de dispositivos de potencia, de los avances en teoría de control y el desarrollo de sistemas embebidos. La EP se relaciona con otras áreas de la ingeniería eléctrica como la teoría electromagnética, circuitos, teoría de señales, electrónica general y conversión de energía.

1.2 Historia de la electrónica de potencia

El origen de la EP se remonta al año de 1900 cuando se construyó el rectificador de arco de mercurio. Sin embargo, es hasta la década de los cincuentas que realmente inicia la EP con el desarrollo de variedad de dispositivos como el rectificador de tubo al alto vacío de rejilla controlada, el ignitrón, el tiratrón, el rectificador de arco metálico y el fanotrón. Estos elementos se utilizaron en el control y la regulación de la energía eléctrica.

La EP moderna se asocia con la invención del transistor de silicio (SCR) realizada en los Bell Telephone Laboratories en el año de 1948. Los Bell Telephone Laboratories también contribuyeron con la invención del transistor de disparo PNP, en 1956.

Hasta la fecha son diversos los dispositivos semiconductores de potencia y las técnicas de conversión que han surgido para impulsar la implementación de la electrónica de potencia en diferentes ramas de la ciencia, especialmente todas las relacionadas con la manipulación de la energía en cualquiera de sus formas.

1.3 Semiconductores de potencia

Los circuitos electrónicos de potencia funcionan utilizando dispositivos semiconductores de potencia, los cuales operan como interruptores para modificar y controlar una tensión o una corriente. Existen interruptores para aplicaciones de baja, media y altas potencias, como se ilustra en la Tabla 1.1.

DISPOSITIVO	POTENCIA
TIRISTOR	ALTA
GTO	ALTA
BJT	MEDIA
IGBT	MEDIA-ALTA
TRIAC	BAJA
MOSFET	BAJA

Tabla 1.1 Rango de potencia semiconductores. [1]

Las principales características para seleccionar el interruptor de potencia son tensión, corriente y frecuencia de trabajo. A continuación se muestran las principales características de operación según las familias.

DISPOSITIVO	TENSIÓN	CORRIENTE	FRECUENCIA
DIODO	<10KV	<5KA	<10MHz
TIRISTOR	<6KV	<5KA	<500Hz
GTO	<6KV	<3KA	<500Hz
BJT	<1KV	<25A	<500Hz
IGBT	<1KV	<100A	<1MHz
TRIAC	<1,2KV	<700A	<25KHz
MOSFET	<2KV	<500A	<75KHz

Tabla 1.2 Principales características de semiconductores [1]

Los interruptores de potencia pueden ser no controlados (diodos), semicontrolados (tiristores SCR y TRIAC) y controlados (mosfet, IGBT, GTO, BJT, transistores bipolares, entre otros).

En la operación de los interruptores de potencia se distinguen dos estados: uno de alta impedancia (bloqueo) y otro de baja impedancia (conducción). Los interruptores se caracterizan por soportar altas tensiones en bloqueo y grandes corrientes en conducción, y son suficientemente rápidos para pasar de un estado a otro [3].

En los convertidores ideales toda la potencia en la entrada se transmite a la salida. Pero debido a las características reales de los interruptores aparecen pérdidas que se disipan en forma de calor y disminuyen

la eficiencia del convertidor. Estas pérdidas se pueden clasificar como: pérdidas en conducción y pérdidas por conmutación.

Las pérdidas por conducción se presentan en los dos estados del interruptor. En estado activo ya en este estado los semiconductores que funcionan como interruptores (diodos) se comportan como una resistencia y presentan una caída de tensión cuando están activos y en bloqueo debido a las corrientes de fuga. Mientras que las pérdidas por conmutación existen debido a los cambios continuos entre el estado de bloqueo y el estado de conducción. La transición no es inmediata, requiere de algunos microsegundos. Durante este intervalo se presentan corrientes y tensiones entre ánodo y cátodo disipando potencia en forma de calor.

1.4 Elementos ideales

Además de los semiconductores, los convertidores buck-boost están compuestos de elementos pasivos. En el caso de convertidores aislados, aparece otro elemento adicional que es el transformador. Si los elementos son ideales no existirán pérdidas en los circuitos de EP. A continuación se mencionan las características ideales de estos elementos.

1.4.1 Semiconductores

Diodo: El diodo permite la circulación de corriente entre sus terminales en un determinado sentido, mientras que la bloquea en el sentido contrario. El diodo ideal presenta resistencia nula en conducción y resistencia infinita durante el bloqueo. Además no dispone de ningún terminal de control.

Interruptor: En un interruptor ideal los estados de bloqueo y conducción se representan mediante un circuito abierto y un cortocircuito respectivamente. Quiere decir, que no hay pérdidas ni en bloqueo ni en conducción y la conmutación de un estado a otro es instantánea.

1.4.2 Elementos pasivos

Los elementos pasivos que constituyen los convertidores de potencia son resistencias, inductancias y condensadores. A continuación se describe el fenómeno que representa cada elemento.

Resistencia: Es el elemento pasivo que se encarga de la oposición al flujo de corriente a través de un conductor.

Inductancia: Es un elemento pasivo que debido al fenómeno de la autoinducción, almacena energía en forma de campo magnético.

Condensador: Un condensador es un dispositivo pasivo, utilizado en electricidad y electrónica, capaz de almacenar energía en forma de campo eléctrico. Está formado por un par de superficies conductoras, generalmente en forma de láminas o placas.

En las características ideales de la inductancia y el condensador la resistencia se considera nula e infinita respectivamente.

1.4.3 Transformador ideal

Características de un transformador ideal:

- Pérdidas en el núcleo igual a cero.
- Capacidades parásitas nulas.
- Permeabilidad en el núcleo igual a cero.
- Resistencia en los devanados igual a cero.

1.5 Convertidores de Potencia

En general, se utilizan convertidores de potencia para el suministro de energía bajo condiciones de voltaje y frecuencia diferentes a las de la red eléctrica. Cada aplicación se basa en un sistema electrónico de potencia que transforma la energía utilizando uno o varios convertidores de potencia. Los convertidores se clasifican en cuatro grupos de acuerdo a la transformación de la señal de energía eléctrica que realiza. La clasificación es: DC-AC, AC-DC, AC-AC, DC-DC.

El convertidor DC-AC también conocido como inversor, convierte el voltaje de entrada de corriente directa (DC) a un voltaje de salida de corriente alterna (AC) con amplitud y frecuencia variable, siendo útiles en aplicaciones como accionamientos de motores de corriente alterna, calentamiento por inducción y fuentes no convencionales de energía. El objetivo del convertidor AC-DC es obtener una tensión de salida DC a partir de una tensión AC. Se emplean en aplicaciones como cargadores de baterías, transporte de energía eléctrica en redes HVDC. El convertidor AC-AC, conocido también como convertidor de corriente alterna permite modificar la amplitud y la frecuencia de la señal de la entrada. Estos convertidores son altamente utilizados en el control de iluminación y control de velocidad de motores de inducción. Por último, el convertidor DC-DC transforma un nivel de tensión DC a un nivel de tensión diferente en DC. Se utilizan en la alimentación de motores de corriente continua y de equipos electrónicos a partir de fuentes de corriente continua o baterías.

En los convertidores DC-DC existen configuraciones básicas ampliamente estudiadas como lo son las topologías: buck, flyback, sepic, forward, boost, buck y buck-boost. La topología buck-boost permite reducir o elevar la tensión DC de entrada siendo útil en aplicaciones como carga y descarga de baterías, redes HVDC y reguladores de tensión en elementos electrónicos.

1.6 Análisis convertidores buck-boost

1.6.1 Estados de operación

Para el análisis de los convertidores buck-boost se aplica la misma metodología de los convertidores DC-DC. En general, la operación del convertidor depende del estado del interruptor. Se tiene entonces dos posibles estados. En el estado 1, el interruptor está cerrado o en conducción ($S=on$) durante un periodo de tiempo DT ; mientras que en el estado 2 el interruptor está abierto o en bloqueo ($S=off$) durante un periodo de tiempo de $(1-D)T$. Siendo D el ciclo de trabajo y T el periodo de conmutación. En Fig. 1.1, se muestra la señal de conmutación $D(t)$ de un interruptor.

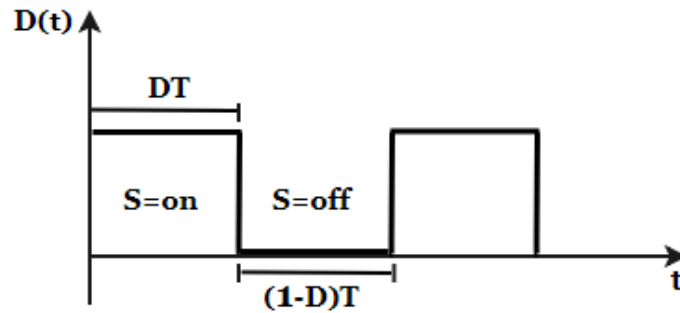


Fig. 1.1. Señal de conmutación para el convertidor buck-boost de un solo interruptor

1.6.2 Balance de potencias

En el análisis de los convertidores DC-DC es común modelar el convertidor como un cuadripolo. En Fig. 1.2, se muestra la representación gráfica del cuadripolo.

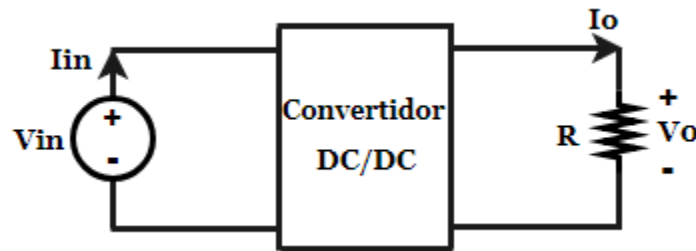


Fig. 1.2 Cuadripolo

Considerando el convertidor como un dispositivo ideal, la potencia en la entrada es igual a la potencia de salida. Reescribiendo la ecuación del balance de potencias en términos de voltajes y corrientes, se obtiene (1.1).

$$V_s I_s = V_o I_o \quad (1.1)$$

1.6.3 Modo continuo y discontinuo de los convertidores

De acuerdo al comportamiento de la corriente en la inductancia los convertidores DC/DC pueden operar en modo continuo o modo discontinuo. En modo continuo la corriente en el inductor es diferente de cero durante el periodo de conmutación, mientras que en el modo discontinuo la corriente se anula antes de terminar el periodo de conmutación. En modo discontinuo existe un intervalo de tiempo durante el cual la corriente es cero. En las gráficas Fig. 1.3 y Fig. 1.4 se muestra la corriente en modo continuo y discontinuo respectivamente.

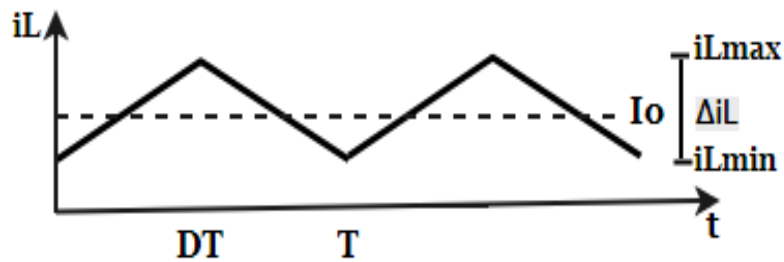


Fig. 1.3 Corriente en el inductor en modo continuo

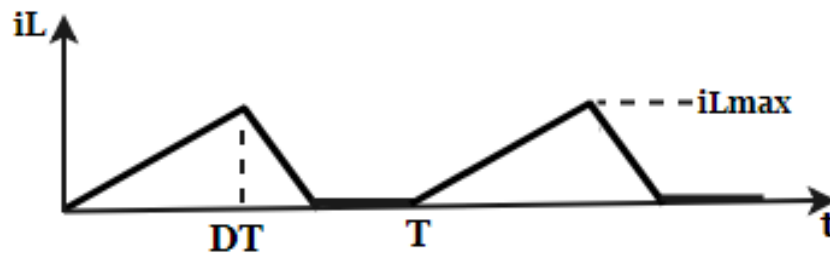


Fig. 1.4 Corriente en el inductor en modo discontinuo

1.6.4 Metodología para hallar la ganancia de voltaje

La ganancia de voltaje (G) es una característica propia de cada convertidor que relaciona el voltaje de entrada y el voltaje de salida.

$$G = \frac{V_o}{V_{in}} \quad (1.2)$$

La ganancia de voltaje puede ser positiva o negativa. Si la ganancia de voltaje es positiva, quiere decir que el voltaje de salida tiene igual polaridad que el voltaje de la entrada. Se dice que el convertidor es no-inversor. Cuando la ecuación de ganancia tiene signo negativo, se dice que el convertidor es inversor e indica que el voltaje de salida tiene polaridad contraria al del voltaje de la entrada.

A continuación, se describe el procedimiento para hallar la ganancia de voltaje del convertidor en régimen continuo y en estado estacionario.

- Obtener los circuitos equivalentes del convertidor para cada estado del interruptor.
- Aplicar la Segunda Ley de Kirchhoff o ley de voltajes en los circuitos anteriores a aquellas mallas donde se encuentren inductancias, y despejar V_L . De esta manera se obtienen $(V_L)_{on}$ y $(V_L)_{off}$.
- Reemplazar el resultado anterior en la ecuación primitiva de la inductancia y despejar la derivada de la corriente, como se muestra en (1.3)

$$\frac{d}{dt}(i_L) = \frac{V_L}{L} \quad (1.3)$$

- Reescribiendo la ecuación anterior para los dos estados del interruptor (conducción y bloqueo), se obtienen (1.4) y (1.5).

$$\frac{(\Delta i_L)_{on}}{DT} = \frac{(V_L)_{on}}{L} \quad (1.4)$$

$$\frac{(\Delta i_L)_{off}}{(1-D)T} = \frac{(V_L)_{off}}{L} \quad (1.5)$$

- Despejar Δi_L de las ecuaciones anteriores y reemplazar en (1.6).

$$(\Delta i_L)_{on} + (\Delta i_L)_{off} = 0 \quad (1.6)$$

Esta ecuación indica que la variación total de la corriente en el inductor en un periodo completo en condición de régimen permanente es igual a cero.

- De la ecuación anterior despejar la relación entre voltaje de salida (V_o) y voltaje de entrada (V_{in}).

1.6.5 Metodología para el análisis de cargabilidad

La cargabilidad de los convertidores buck-boost se define como la relación existente entre la corriente promedio de la carga (I_o) y la corriente promedio del inductor o de los inductores (I_L), así como se indica en (1.7):

$$\text{Cargabilidad} = I_o / I_L \quad (1.7)$$

Para hallar la relación anterior, se debe:

- Obtener el circuito equivalente del convertidor cuando $S = 0_n$.
- Aplicar la primera ley de Kirchhoff o ley de corrientes, al nodo donde está conectada la fuente de alimentación V_{in} y el inductor.
- La corriente en la fuente i_{in} se obtiene a partir de (1.7), siempre que en el estado $S = \text{off}$ la fuente quede aislada del inductor. D corresponde al ciclo de trabajo del convertidor, ver Fig. 1.1. Si la fuente queda conectada al inductor, la corriente se obtiene mediante (1.9). Para convertidores que presentan más de un inductor, la ecuación de corriente promedio en la fuente depende de las corrientes por cada uno de los inductores según (1.10).

Caso 1	$i_{in} = D \cdot I_L$	(1.8)
Caso 2	$i_{in} = I_L$	(1.9)
Caso 3	$i_{in} = D(I_{L1} + I_{L2} + \dots + I_{Ln})$	(1.10)

Tabla 1.3. Diferentes casos de corriente en la fuente según la topología

Luego, se reemplaza i_{in} en la relación entre potencia de entrada (P_{in}) y potencia de salida (P_{out}) de un convertidor ideal. Ver (1.7), y se despeja la cargabilidad. Los diferentes casos se resumen en la tabla 1.4. Donde G es la ganancia de voltaje.

Caso	I_{in}	$\frac{I_o}{I_L}$
1	$D I_L$	$D \cdot G^{-1}$
2	I_L	G^{-1}
3	$D(I_{L1} + I_{L2} \dots + I_{Ln})$	$D \cdot G^{-1}$

Tabla 1.4. Diferentes casos de cargabilidad según la topología

1.7 Convertidor buck-boost básico

La topología básica del convertidor buck-boost se muestra en Fig. 1.5. La topología está compuesta de dos elementos almacenadores de energía (un inductor y un condensador), un dispositivo de conmutación (semiconductor de potencia), un diodo, una carga resistiva y una fuente DC. Este convertidor también se conoce como convertidor buck-boost de un solo interruptor.

El convertidor puede entregar en la salida un voltaje menor (modo buck) o mayor al voltaje de la entrada (modo boost). El modo de trabajo del convertidor está relacionado con el ciclo de trabajo. Si $D < 0.5$ el convertidor trabaja en modo buck y si $D > 0.5$ el convertidor trabaja en modo boost. A continuación, se muestra la topología básica de convertidor buck-boost [2].

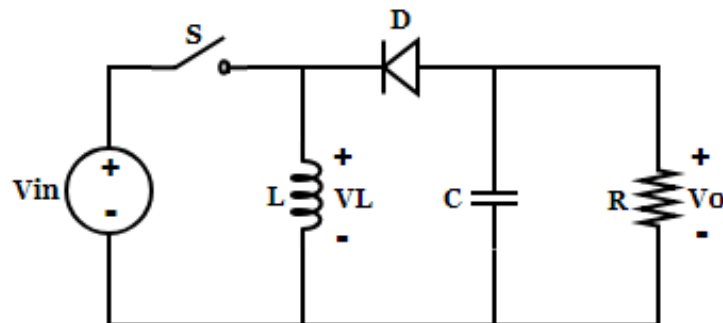


Fig. 1.5 Convertidor buck-boost clásico

Modelo

A continuación se implementa la metodología propuesta para hallar la ganancia de voltaje y la cargabilidad del convertidor.

Ganancia de voltaje del convertidor buck-boost clásico.

Estado 1 (S=on)

Análisis comparativo de diferentes topologías de convertidores buck-boost utilizando MatLab

Durante este estado la fuente de voltaje está directamente conectada al inductor L. Se cumple que $V_{in} = V_L$. En este intervalo de tiempo se realiza la carga del inductor. El circuito equivalente se muestra en Fig. 1.6.

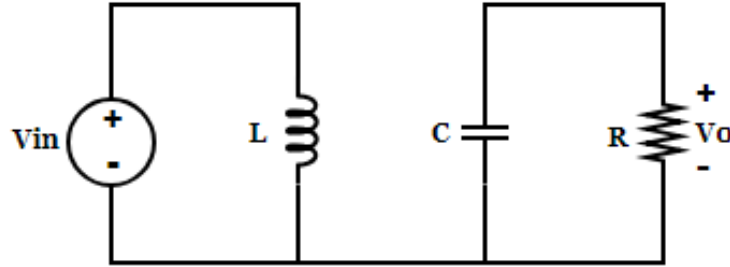


Fig. 1.6 Convertidor buck-boost clásico con $S=on$.

Estado 2 ($S=off$)

En este estado el inductor L está conectado en paralelo a la carga R y al condensador C, ver Fig. 1.7. La energía transferida a C y a R, es la energía almacenada en el inductor (descarga).

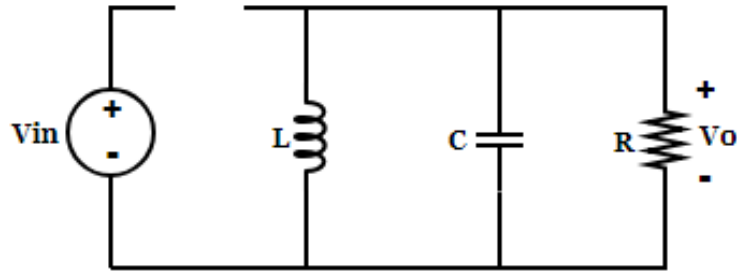


Fig. 1.7 Convertidor buck-boost clásico con $S=off$.

De Fig. 1.6 y Fig. 1.7 se obtiene:

$$(V_L)_{on} = V_{in} \quad (1.11)$$

$$(V_L)_{off} = V_o \quad (1.12)$$

Sustituyendo estos resultados en (1.4) y (1.5) se obtiene:

$$(\Delta i_L)_{on} = \frac{V_{in} \cdot D \cdot T}{L} \quad (1.13)$$

$$(\Delta i_L)_{off} = \frac{V_o(1 - D)T}{L} \quad (1.14)$$

Reemplazando las ecuaciones anteriores en (1.6), y despejando se obtiene la ganancia de voltaje del convertidor.

$$G = -\frac{D}{(1-D)} \quad (1.15)$$

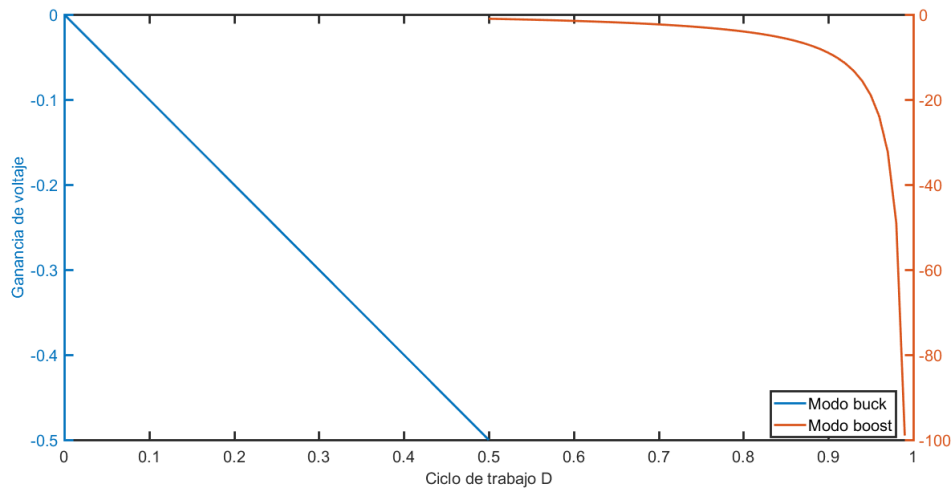


Fig. 1.8 Gráfica de ganancia de voltaje del convertidor buck-boost clásico

Cargabilidad convertidor buck-boost clásico

Este convertidor satisface la expresión (1.8). En consecuencia, la cargabilidad se obtiene mediante (1.16)

$$\frac{I_o}{I_L} = D \cdot G^{-1} \quad (1.16)$$

Reemplazando la ganancia de voltaje en la ecuación anterior resulta (1.17), que es la expresión final de cargabilidad para el convertidor buck-boost de un solo interruptor.

$$\frac{I_o}{I_L} = -(1-D) \quad (1.17)$$

Capítulo 2

En este capítulo se presentan y analizan diferentes clases de convertidores de potencia buck-boost, de acuerdo a los procedimientos definidos en el capítulo anterior. Los convertidores estudiados son clasificados en diferentes familias según características comunes. En el análisis se tiene en cuenta dos variables: ganancia de voltaje y cargabilidad. Finalmente, se incluye un análisis comparativo.

2. Clasificación de familias buck-boost

2.1 Convertidores buck-boost

En la literatura se encuentran principalmente dos formas de clasificación de convertidores buck-boost. De acuerdo al orden del circuito, se pueden clasificar como convertidores de segundo o de cuarto orden. Y según el número de interruptores independientes, se pueden clasificar como mono-variable o SISO (una entrada, una salida), y multivariable o MIMO (múltiples entradas, múltiples salidas).

A continuación se presenta una clasificación propia, teniendo en cuenta características como: número de interruptores, dirección del flujo de potencia, aislamiento, acoplamiento magnético, elementos almacenadores de energía, y ganancia.

2.2 Familia de convertidores buck-boost de un interruptor

2.2.1 Convertidor buck-boost de un interruptor tipo 1

Este convertidor tiene dos elementos almacenadores de energía, un inductor y un capacitor. Además cuenta con tres diodos, un interruptor de potencia, una fuente de voltaje y una carga R . Por otro lado este dispositivo trabaja de una forma inversora, entregando así un voltaje a la salida negativa. Este circuito es usado como regulador de tensión en dispositivos electrónicos, vehículos eléctricos y micro redes [3].

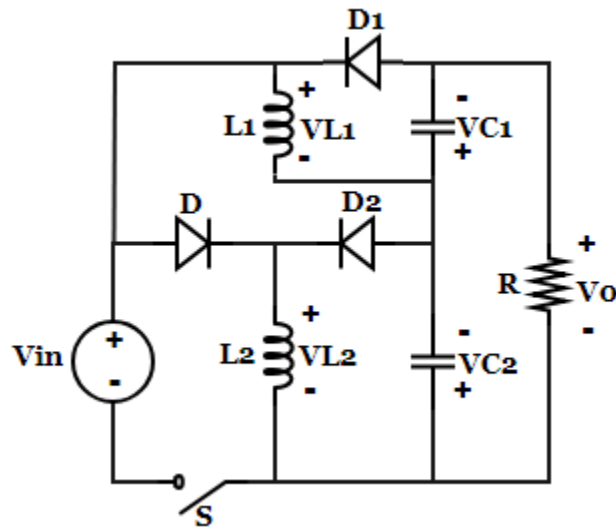


Fig. 2.1 Convertidor buck-boost de un interruptor tipo 1

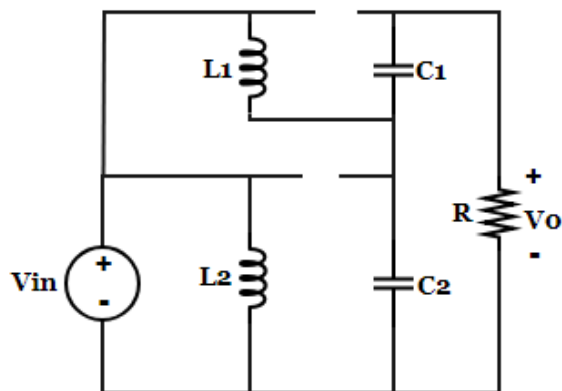
Principio de funcionamiento

Este convertidor opera de forma inversora, por tanto se obtiene un voltaje negativo a la salida del convertidor. Cuando el interruptor está cerrado ($S=on$), el diodo D se polariza en directa, y los diodos $D1$ y $D2$ se polarizan de forma inversa. Cuando el interruptor está abierto ($S=off$), el diodo D se polariza inversamente y los diodos $D1$ y $D2$ se polarizan en forma directa.

2.2.1.1 Ganancia de voltaje del convertidor buck-boost de un interruptor tipo 1

Estado 1

En esta etapa el interruptor está cerrado y el circuito equivalente se muestra a continuación.

Fig. 2.2 Convertidor buck-boost de un interruptor con $S=on$

Estado 2

El interruptor está abierto. El circuito equivalente se muestra en Fig. 2.3.

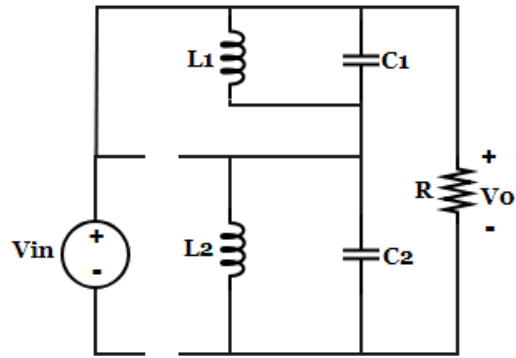


Fig. 2.3 Convertidor de un interruptor con S=off

De Fig. 2.2 y Fig. 2.3 se obtiene:

$$(V_{L1})_{on} = V_{in} + V_{C2} \quad (2.1)$$

$$(V_{L2})_{on} = V_{in} \quad (2.2)$$

$$(V_{L1})_{off} = -V_{C1} \quad (2.3)$$

$$(V_{L2})_{off} = -V_{C2} \quad (2.4)$$

Sustituyendo estos resultados en (1.4) y (1.5), se obtiene:

$$(\Delta i_{L1})_{on} = \frac{V_{in} + V_{C2}}{L_1} DT \quad (2.5)$$

$$(\Delta i_{L2})_{on} = \frac{V_{in}}{L_2} DT \quad (2.6)$$

$$(\Delta i_{L1})_{off} = -\frac{(V_{C1})(1 - D)T}{L_1} \quad (2.7)$$

$$(\Delta i_{L2})_{off} = -\frac{(V_{C2})(1 - D)T}{L_2} \quad (2.8)$$

Reemplazando las ecuaciones anteriores en (1.6), y despejando V_{Co1} y V_{Co2} se obtiene:

$$V_{C1} = \frac{(V_{in} + V_{C2})D}{1 - D} \quad (2.9)$$

$$VC2 = \frac{(Vin)D}{1 - D} \quad (2.10)$$

Para este convertidor el voltaje en la carga esta dado por (2.1.10)

$$Vo = -(VC1 + VC2) \quad (2.11)$$

Reemplazando las ecuaciones (2.9) y (2.10) en (2.11) y despejando, se obtiene la ganancia de voltaje para este convertidor, la cual se indica en (2.12).

$$\frac{Vo}{Vin} = \frac{2D - D^2}{(1 - D)^2} \quad (2.12)$$

2.2.1.2 Cargabilidad convertidor buck-boost de un interruptor tipo 1

Este convertidor cumple con (1.8), por lo tanto la cargabilidad se obtiene mediante (2.13).

$$\frac{Io}{IL} = D \cdot G^{-1} \quad (2.13)$$

Al reemplazar la ganancia de voltaje en (2.13), se llega a la expresión final de cargabilidad, la cual es mostrada en (2.14).

$$\frac{Io}{IL} = \frac{1 - D}{2} \quad (2.14)$$

2.2.2 Convertidor buck-boost de un interruptor tipo 2

El convertidor mostrado en Fig. 2.4, esta compuesto de un solo interruptor de potencia, 2 elementos semiconductores (diodos), una fuente de alimentación, una carga, y algunos elementos almacenadores de energía, entre los que se encuentran tres condensadores y dos inductores. Por otro lado este convertidor siempre entrega un voltaje de salida positivo, por lo que trabaja de una forma no inversora, además, al igual que el convertidor de un interruptor mostrado en Fig. 2.1, este convertidor trabaja en modo buck o reductor para un ciclo de trabajo $D < 0.5$, mientras que para todo $0.5 \leq D < 1$ este convertidor trabaja en modo boost o elevador. En cuanto a su uso, este convertidor es utilizado aplicaciones de pilas de combustible y dispositivos portátiles, como computadores y celulares [4].

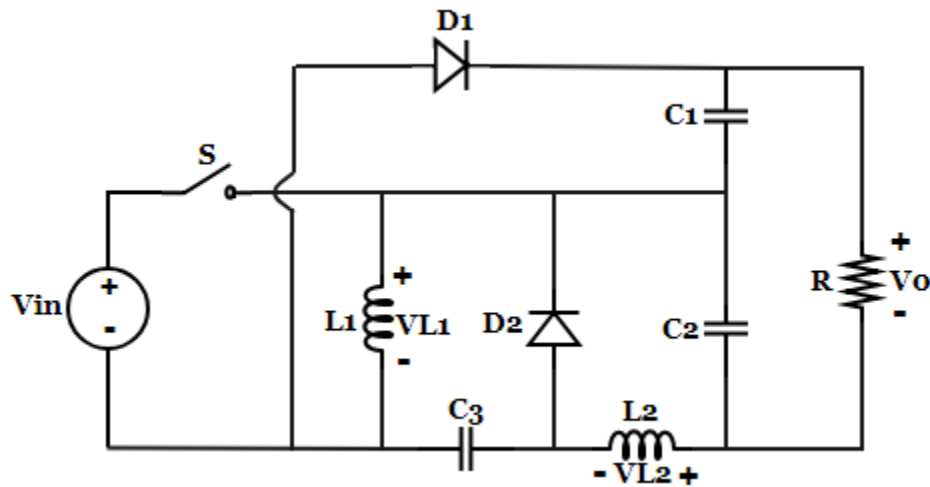


Fig. 2.4 Convertidor buck-boost de un interruptor tipo 2

Aplicando un procedimiento equivalente al del convertidor anterior se obtiene las ecuaciones de ganancia de voltaje y cargabilidad para el convertidor de un interruptor tipo 2.

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{2D}{1-D} \quad (2.15)$$

$$\frac{I_o}{I_L} = \frac{1-D}{2} \quad (2.16)$$

2.3 Familia de convertidores buck-boost con acoplamiento magnético.

2.3.1 Convertidor buck-boost con acoplamiento magnético tipo 1

Este convertidor cuenta con un condensador, dos inductores mutuamente acoplados, un interruptor de potencia, un diodo, una fuente de voltaje y una resistencia. A diferencia del convertidor buck-boost de un solo interruptor, este convertidor tiene la capacidad de almacenar mayor cantidad de energía debido a los inductores acoplados. Además, trabaja de una forma inversora y es usado en vehículos eléctricos [5].

El convertidor buck-boost con acoplamiento tiene las mismas características de funcionamiento del convertidor de un interruptor mencionado anteriormente. Para $D > 0.5$ se tiene un voltaje a la salida mayor que a la entrada, es decir, el convertidor opera en modo boost y para $D < 0.5$ el voltaje de salida es menor al de entrada, por tanto el convertidor funciona en modo buck.

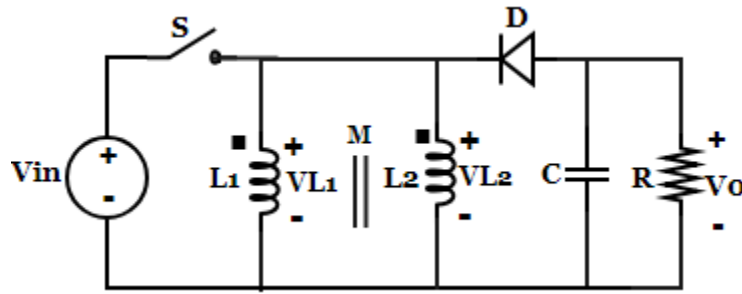


Fig. 2.5 Convertidor buck-boost con acoplamiento magnético

Principio de funcionamiento

Para efectos de simplicidad, en el análisis del circuito mencionado, los inductores $L1$ y $L2$ serán reemplazados por un inductor equivalente Leq , tal como se muestra en la Fig. 2.6.

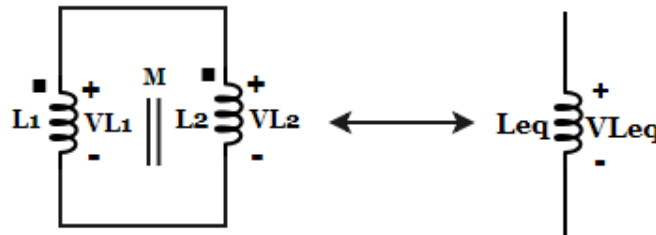


Fig. 2.6 Inductor equivalente

Siendo:

$$Leq = \frac{L1 \cdot L2 - M^2}{(L1 + L2 - 2M)} \quad (2.17)$$

2.3.1.1 Ganancia de voltaje del convertidor buck-boost con acoplamiento magnético tipo 1

Estado 1

En esta etapa el interruptor S está cerrado. Durante este estado la fuente de voltaje está directamente conectada a los inductores acoplados $L1$ y $L2$, por lo tanto $V_{in} = V_{L1} = V_{L2} = V_{Leq}$. Durante este intervalo de tiempo los inductores almacenan energía.

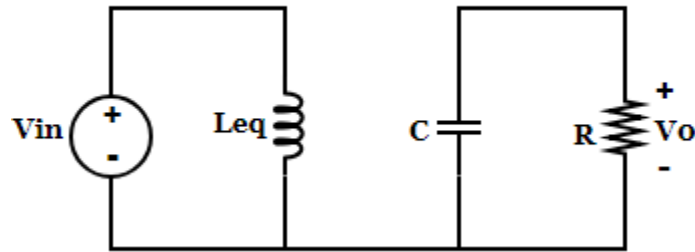


Fig. 2.7 Convertidor buck-boost con acoplamiento magnético con S=on

Estado 2

En esta etapa el interruptor S está abierto. Durante este estado el inductor Leq queda conectado en paralelo a la carga R y al condensador C, transfiriendo energía a C y R.

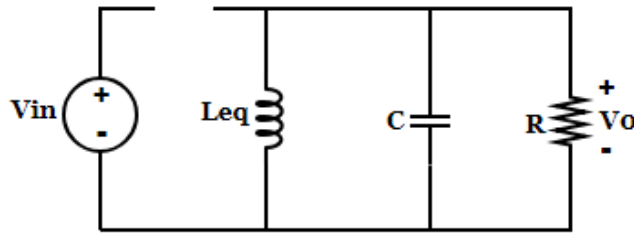


Fig. 2.8 Convertidor buck-boost con acoplamiento magnético con S=off

Aplicando sumatoria de voltajes en los circuitos equivalentes se obtiene:

$$(V_{Leq})_{on} = V_{in} \quad (2.18)$$

$$(V_{Leq})_{off} = V_o \quad (2.19)$$

Sustituyendo estos resultados en (1.4) y (1.5) se obtiene:

$$(\Delta i_{Leq})_{on} = \frac{V_{in} \cdot D \cdot T}{L_{eq}} \quad (2.20)$$

$$(\Delta i_{Leq})_{off} = \frac{V_o(1 - D)T}{L_{eq}} \quad (2.21)$$

Reemplazando (2.20) y (2.21) en (1.6) y despejando la ganancia de voltaje, se halla (2.22).

$$\frac{V_o}{V_{in}} = -\frac{D}{(1 - D)} \quad (2.22)$$

El comportamiento de voltaje a la salida de este convertidor es de forma inversora, es decir, que a la salida siempre se va a tener un voltaje de signo opuesto al de la fuente.

2.3.1.2 Cargabilidad convertidor buck-boost con acoplamiento magnético tipo 1

Este convertidor satisface la expresión (1.10), luego la cargabilidad se obtiene mediante la expresión (2.23).

$$\frac{I_o}{I_{L1} + I_{L2}} = D \cdot G^{-1} \quad (2.23)$$

Reemplazando la ganancia de voltaje en la ecuación (2.23), se obtiene la expresión final tal como se muestra en (2.24).

$$\frac{I_o}{I_{L1} + I_{L2}} = -(1 - D) \quad (2.24)$$

2.3.2 Convertidor buck-boost con acoplamiento magnético tipo 2

El circuito mostrado en Fig. 2.9, en su forma constructiva cuenta con dos interruptores de potencia, dos dispositivos semiconductores (diodos), cuatro inductores, de los cuales dos de ellos se encuentran acoplados magnéticamente, dos condensadores, además de una fuente de alimentación y una carga R. El voltaje que este convertidor entrega a la carga es de igual signo que el de la fuente de voltaje, y para todo ciclo de trabajo $D < 0.5$ se garantiza un voltaje a la salida menor que el de entrada, mientras que para un ciclo de trabajo comprendido entre $0.5 < D < 1$, el voltaje que se le entrega a la carga es mayor que el de la fuente de alimentación. En cuanto aplicaciones, este convertidor es usado en aplicaciones que tienen que ver con baterías y paneles solares[6].

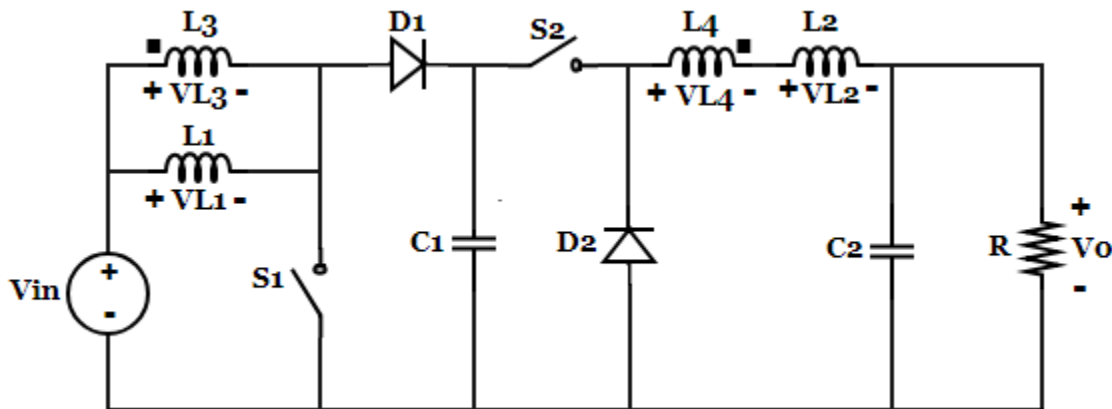


Fig. 2.9 Convertidor buck-boost con acoplamiento tipo 2.

Aplicando un procedimiento equivalente al del convertidor anterior se obtiene las ecuaciones de ganancia de voltaje y cargabilidad para el convertidor con acoplamiento magnético tipo 2, las cuales se indican en (2.25) y (2.26).

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{D}{1-D} \quad (2.25)$$

$$\frac{I_o}{I_L} = \frac{1-D}{D} \quad (2.26)$$

2.4 Familia de convertidores buck-boost de dos interruptores

2.4.1 Convertidor buck-boost de dos interruptores tipo 1

En su forma constructiva este convertidor cuenta con dos interruptores de potencia, dos diodos, un condensador, un inductor, una fuente de voltaje y una carga R. Este convertidor trabaja de forma no inversora, entregando así un voltaje de salida positivo. Este dispositivo es usado en aplicaciones de vehículos eléctricos y bancos de baterías [7].

Este tipo de convertidor surge de la conexión en cascada de un convertidor buck con un convertidor boost tal como se muestra en la Fig. 2.10.

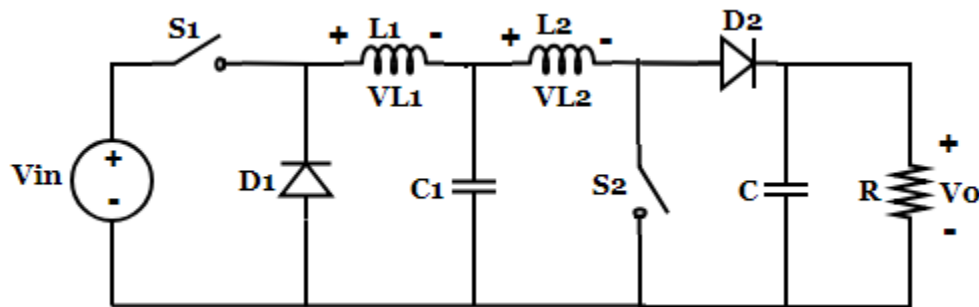


Fig. 2.10 Convertidor buck-boost en cascada de dos interruptores

El convertidor buck-boost que se muestra, opera en modo buck cuando $D < 0.5$, suministrando así un voltaje a la salida menor que el de entrada, y cuando $D > 0.5$ el convertidor opera en modo boost, por lo tanto el voltaje de salida es mayor que el de entrada. Sin embargo este circuito presenta algunos elementos que pueden ser retirados con el fin de obtener un circuito cuyo análisis operativo sea más simple. Una vez retirado el condensador intermedio C_1 y haciendo el equivalente de los inductores L_1 y L_2 por L del convertidor de Fig. 2.10, Se obtuvo el circuito de Fig. 2.11 [7]

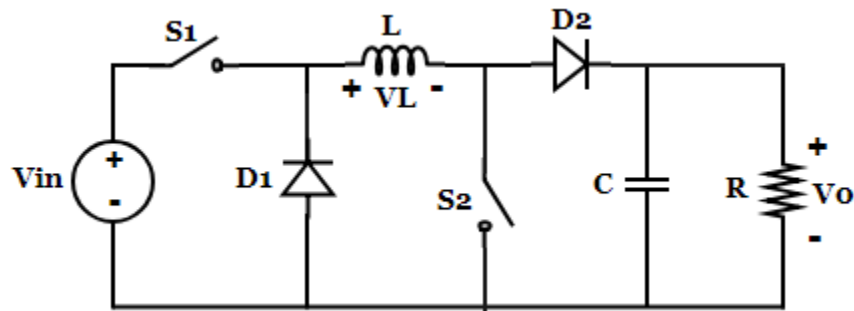


Fig. 2.11 Convertidor buck-boost de dos interruptores

Principio de funcionamiento

Los interruptores S1 y S2 conmutan simultáneamente tanto en modo buck como en modo boost. Esta topología corresponde a un convertidor no inversor.

2.4.1.1 Ganancia de voltaje del convertidor buck-boost de dos interruptores tipo 1

Estado 1

Durante este intervalo de tiempo los interruptores S1 y S2 están cerrados. Así los diodos quedan polarizados inversamente, y a su vez se tiene un voltaje en el inductor igual al de la fuente de alimentación, tal como se muestra en Fig. 2.12.

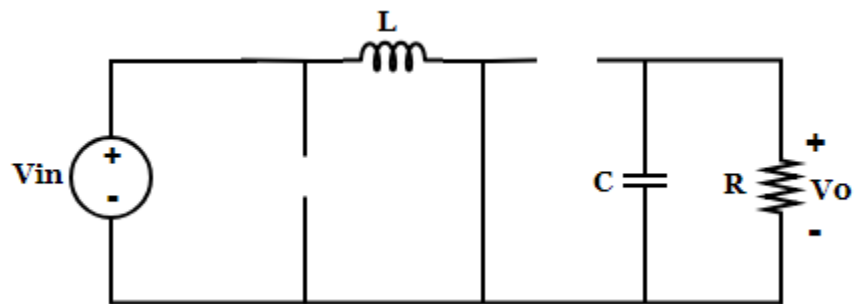


Fig. 2.12 Convertidor buck-boost de dos interruptores con S=on

Estado 2

En este estado los interruptores S1 y S2 se abren polarizando los diodos en directa y aislando la fuente de tensión de los demás elementos del circuito, siendo el voltaje del inductor igual al voltaje de salida, tal como se muestra en Fig. 2.13.

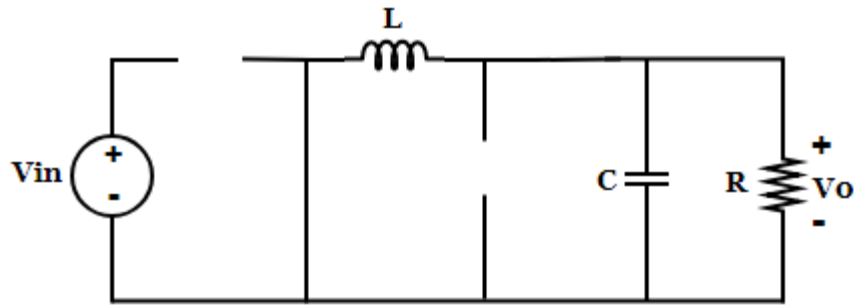


Fig. 2.13 Convertidor buck-boost de dos interruptores con S=off

Aplicando sumatoria de voltajes en los circuitos equivalentes se obtiene:

$$(V_L)_{on} = V_{in} \quad (2.27)$$

$$(V_L)_{off} = -V_o \quad (2.28)$$

Sustituyendo estos resultados en (1.4) y (1.5) se obtiene (2.29), (2.30):

$$(\Delta i_L)_{on} = \frac{V_{in} \cdot DT}{L} \quad (2.29)$$

$$(\Delta i_L)_{off} = \frac{-V_o(1 - D)T}{L} \quad (2.30)$$

Reemplazando (2.29) y (2.30) en (1.6) y despejando la ganancia de voltaje, se halla (2.31).

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{D}{(1 - D)} \quad (2.31)$$

2.4.1.2 Cargabilidad del convertidor buck-boost de dos interruptores tipo 1.

Este convertidor cumple con la expresión (1.8), por tanto, su cargabilidad es determinada mediante (13).

$$\frac{I_o}{I_L} = D \cdot G^{-1} \quad (2.32)$$

Al sustituir la ganancia de voltaje en la ecuación anterior resulta (2.33), que corresponde a la cargabilidad del convertidor.

$$\frac{I_o}{I_L} = (1 - D) \quad (2.33)$$

2.4.2 Convertidor buck-boost de dos interruptores tipo 2

El convertidor que se muestra en Fig. 2.14. está compuesto por dos interruptores de potencia, dos diodos, un condensador, un inductor, una fuente de voltaje y una carga R . En cuanto a la salida de voltaje, este convertidor trabaja de una forma no inversora, entregando siempre a la salida un voltaje positivo que puede ser mayor o menor que el voltaje de entrada, dependiendo del ciclo de trabajo. Para un ciclo de trabajo $D < 0.5$ el convertidor trabaja en modo buck o reductor, mientras que para un ciclo de trabajo $0.5 < D < 1$, el convertidor trabaja en modo boost o elevador. El convertidor buck-boost de dos interruptores es apropiado en aplicaciones de vehículos eléctricos y pilas de combustible[8].

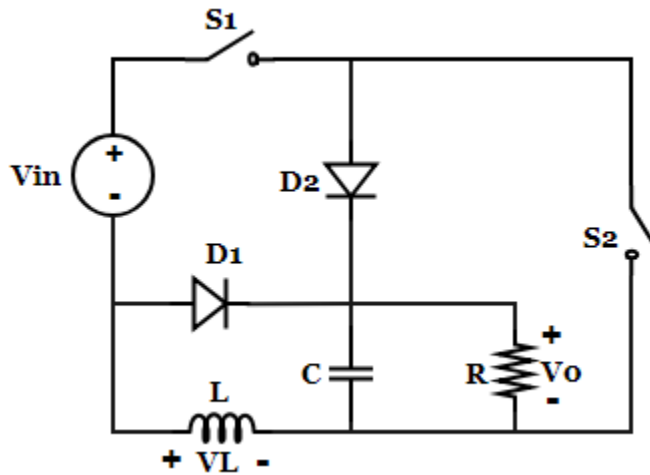


Fig. 2.14 Convertidor buck-boost de dos interruptores tipo 2

Aplicando un procedimiento equivalente al del convertidor anterior se obtiene las ecuaciones de ganancia de voltaje y cargabilidad para el convertidor de dos interruptores tipo 2, las cuales se indican en (2.34) y (2.35).

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{D}{1 - D} \quad (2.34)$$

$$\frac{I_o}{I_L} = 1 - D \quad (2.35)$$

2.5 Familia de convertidores buck-boost de cuatro interruptores.

2.5.1 Convertidor buck-boost de cuatro interruptores tipo 1

Este convertidor está compuesto principalmente de cuatro interruptores de potencia, un condensador, un inductor, una fuente de voltaje y una carga R . A diferencia de los convertidores mencionados hasta el momento, el convertidor buck-boost de cuatro interruptores no cuenta con diodos, esto se debe a que el circuito está bajo un esquema de rectificación síncrona, el cual consiste en reemplazar los diodos por

Análisis comparativo de diferentes topologías de convertidores buck-boost utilizando MatLab

interruptores con el fin de mejorar la eficiencia del dispositivo. El voltaje de salida de este convertidor es siempre positivo, y es utilizado en sistemas de baterías [9].

Este convertidor está compuesto de la conexión en cascada de un convertidor buck con un boost, en donde S1 y S3 interruptores activos, mientras que S2 y S4 consisten en un esquema de rectificación síncrona.

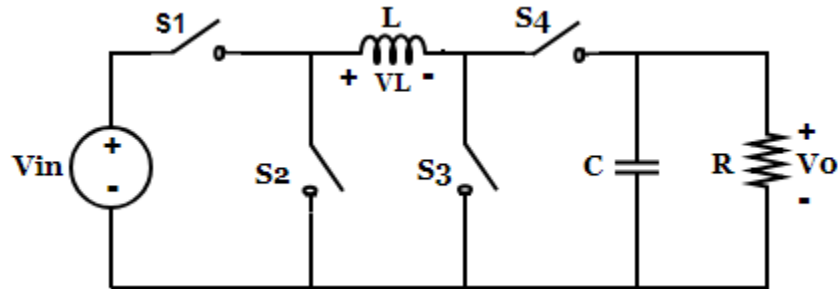


Fig. 2.15 Convertidor buck-boost de cuatro interruptores tipo 1

Principio de funcionamiento

Este tipo de convertidor tiene dos etapas de funcionamiento gracias al estado on y al estado off de los interruptores, donde en cada modo de trabajo hay un interruptor principal y uno complementario. En modo buck S1 es el interruptor principal con ciclo de trabajo ajustable y S2 trabaja de forma complementaria, de igual manera para modo boost, en donde S3 es el interruptor principal con un ciclo de trabajo que es ajustable y S4 opera de manera complementaria.

Modo buck

En esta etapa se requiere de un voltaje a la salida menor que a la entrada, por lo que el interruptor S3 está abierto y S4 cerrado permanentemente. De esta manera S1 trabaja como interruptor principal con un ciclo de trabajo ajustable y S2 están trabajando de manera complementaria, lo que quiere decir que no se requiere una conmutación simultánea de ambos interruptores.

A diferencia de los convertidores buck-boost ya mencionados, el convertidor que aquí se menciona no presenta una única ganancia de voltaje debido al número de interruptores, por lo que en cada modo de operación se hace necesaria una ganancia de voltaje tanto en modo buck como en modo boost. El circuito equivalente en modo buck se muestra en Fig. 2.16.

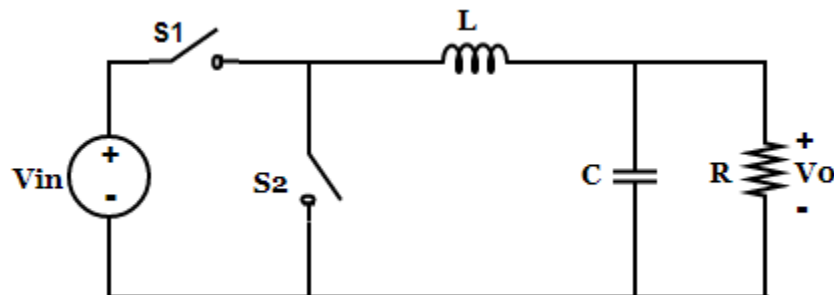


Fig. 2.16 Convertidor buck-boost de cuatro interruptores en estado buck

En el circuito de la figura anterior no es necesario un trabajo simultáneo de S1 y S2, por lo tanto para determinar la ganancia del convertidor en modo buck se intercambiarán los modos de funcionamiento de los interruptores, siendo S1 el principal y S2 el auxiliar.

2.5.1.1 Ganancia de voltaje del convertidor buck-boost de cuatro interruptores tipo 1

Estado 1

Durante esta etapa el interruptor S1 está cerrado y S2 abierto.

Estado 2

Durante esta etapa el interruptor S1 está abierto y S2 cerrado.

Haciendo una suma de voltajes en los circuitos equivalentes en modo buck, se tiene:

$$(VL)_{on} - off = V_{in} - V_o \quad (2.36)$$

$$(VL)_{off} - on = -V_o \quad (2.37)$$

Sustituyendo estos resultados en (1.4) y (1.5), resultan (2.38), (2.39)

$$(\Delta iL)_{on} - off = \frac{(V_{in} - V_o)DT}{L} \quad (2.38)$$

$$(\Delta iL)_{off} - on = -\frac{V_o(1 - D)T}{L} \quad (2.39)$$

Reemplazando (2.38) y (2.39) en (1.6) y despejando la ganancia de voltaje para el modo buck, se halla (2.40).

$$\frac{V_o}{V_{in}} = D \quad (2.40)$$

En (2.40) se ratifica que el convertidor en los estados ya mencionados funciona siempre en modo buck para un valor de $D < 1$.

Modo boost

En esta etapa se requiere de un voltaje a la salida mayor que a la entrada, por lo que el interruptor S2 está abierto y S1 cerrado permanentemente. De esta manera S3 trabaja como interruptor principal con un ciclo de trabajo ajustable y S4 está trabajando de manera complementaria, lo que quiere decir que no se requiere una conmutación simultánea de ambos interruptores. El circuito equivalente en modo boost en mostrado en Fig. 2.17.

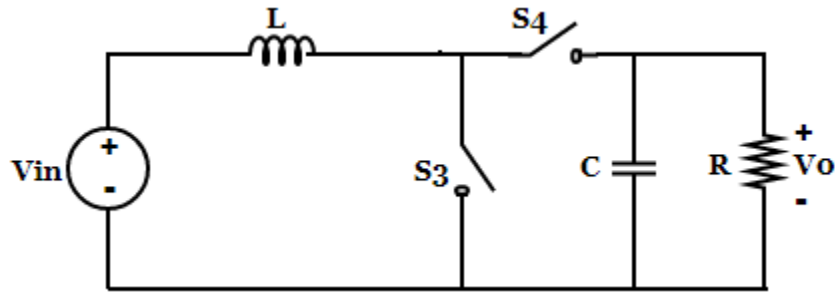


Fig. 2.17 Convertidor buck-boost de cuatro interruptores en estado boost

De igual forma que en el modo de funcionamiento buck ya mencionado, el equivalente en modo boost de la figura anterior se analizara bajo las mismas condiciones, es decir S3 y S4 no requieren de un funcionamiento simultáneo; siendo S3 el principal y S4 el auxiliar.

Estado 1

Durante esta etapa el interruptor S3 está cerrado y S4 abierto.

Estado 2

Durante esta etapa el interruptor S3 está abierto y S4 cerrado.

Haciendo una suma de voltajes en los circuitos equivalentes en modo boost, se tiene:

$$(V_L)_{\text{on} - \text{off}} = V_{\text{in}} \quad (2.41)$$

$$(V_L)_{\text{off} - \text{on}} = V_{\text{in}} - V_o \quad (2.42)$$

Reemplazando las ecuaciones anteriores en (1.4) y (1.5), resultan (2.43), (2.44)

$$(\Delta i_L)_{\text{on} - \text{off}} = \frac{V_{\text{in}} D T}{L} \quad (2.43)$$

$$(\Delta i_L)_{\text{off} - \text{on}} = \frac{(V_{\text{in}} - V_o)(1 - D)T}{L} \quad (2.44)$$

Sustituyendo (2.43) y (2.44) en (1.6) y despejando la ganancia de voltaje para el modo buck, se halla (2.45).

$$\frac{V_o}{V_{\text{in}}} = \frac{1}{(1 - D)} \quad (2.45)$$

Este tipo de convertidor además trabaja de una manera no inversora, entregando así un voltaje a la salida mayor o menor que el de la entrada.

Análisis comparativo de diferentes topologías de convertidores buck-boost utilizando MatLab

La Tabla 2.1, muestra el esquema de funcionamiento del convertidor buck-boost de cuatro interruptores, para sus diferentes estados de operación.

Modo de operación	S1	S2	S3	S4
Buck	Conmutando	Conmutando	Off	On
Boost	On	Off	Conmutando	Conmutando

Tabla 2.1 Esquema de funcionamiento del convertidor buck-boost de cuatro interruptores

2.5.1.2 Cargabilidad del convertidor buck-boost de cuatro interruptores tipo 1

Al igual que el convertidor anterior, el convertidor de cuatro interruptores cumple con (1.8), siempre y cuando trabaje en modo buck; por tanto, la cargabilidad se determina mediante (2.46).

$$\frac{I_o}{I_L} = D \cdot G^{-1} \quad (2.46)$$

Reemplazando la ganancia de voltaje en la ecuación anterior, se obtiene la ecuación (2.47), que corresponde a una cargabilidad constante en todo momento.

$$\frac{I_o}{I_L} = 1 \quad (2.47)$$

Sin embargo, cuando esté convertidor trabaja en modo boost, la expresión que cumple es (1.9), de esta forma la cargabilidad es determinada mediante (2.48).

$$\frac{I_o}{I_L} = G^{-1} \quad (2.48)$$

Para la ecuación (17) se reemplaza la ganancia de voltaje del convertidor, llegando así a la ecuación (2.49), la cual representa la cargabilidad del convertidor en modo boost.

$$\frac{I_o}{I_L} = (1 - D) \quad (2.49)$$

2.5.2 Convertidor buck-boost de cuatro interruptores tipo 2

El convertidor mostrado en Fig. 2.18. esta compuesto de cuatro interruptores de potencia, un inductor y un condensador; además, una fuente de alimentación y una carga R. En cuanto al modo de funcionamiento, este convertidor tiene la capacidad de operar en modo buck y modo boost de manera independiente, es decir, para todo ciclo D comprendido entre valores mayores a cero pero menores a 1,

Análisis comparativo de diferentes topologías de convertidores buck-boost utilizando MatLab

el convertidor trabaja reduciendo o elevando el voltaje de salida respecto al de entrada, todo esto dependiendo de las necesidades, y de los interruptores que se conmuten. El principio de funcionamiento de este convertidor es igual al del convertidor anterior.

El convertidor buck-boost de cuatro interruptores es ampliamente utilizado en aplicaciones de vehículos eléctricos [10].

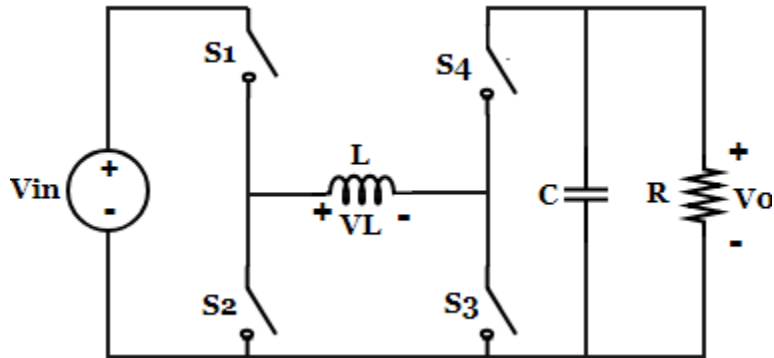


Fig. 2.18 Convertidor buck-boost de cuatro interruptores tipo 2

Aplicando un procedimiento equivalente al del convertidor anterior se obtiene las ecuaciones de ganancia de voltaje y cargabilidad en los modos buck y boost para el convertidor de cuatro interruptores tipo 2, las cuales se indican a continuación.

Ganancia de voltaje en modo buck

$$\frac{V_o}{V_{in}} = D \quad (2.50)$$

Ganancia de voltaje en modo boost

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1 - D} \quad (2.51)$$

Cargabilidad en modo buck

$$\frac{I_o}{I_L} = 1 \quad (2.52)$$

Cargabilidad en modo boost

$$\frac{I_o}{I_L} = 1 - D \quad (2.53)$$

2.6 Familia de convertidores buck-boost KY

2.6.1 Convertidor buck-boost KY tipo 1

En cuanto al número de elementos almacenadores de energía, el convertidor KY cuenta con dos condensadores y dos inductores, además, cuenta con dos diodos, dos interruptores de potencia, una fuente de voltaje y una carga R , sin embargo, es un convertidor bastante compacto y de bajo costo. El convertidor KY trabaja de una forma no inversora, entregando siempre a su salida un voltaje positivo. En cuanto a sus aplicaciones, este dispositivo es empleado en computadores portátiles y vehículos eléctricos [11].

Este circuito puede funcionar tanto en modo buck, como boost, también trabaja de una forma no inversora, entregando un voltaje a la salida siempre positivo que puede ser mayor o menor al de entrada. Para un ciclo de trabajo $D < 0.5$ este convertidor trabaja como buck o reductor, mostrando un voltaje de salida menor que el de entrada y para un $D > 0.5$, el convertidor trabaja como boost o elevador, suministrando un voltaje a la salida mayor que el de entrada.

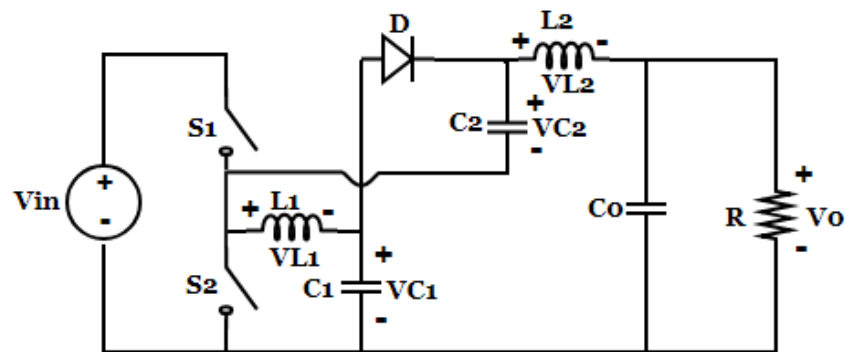


Fig. 2.19 Convertidor buck-boost KY tipo 1

Principio de funcionamiento

Este convertidor puede reducir o elevar el voltaje en la carga a través de dos estados definidos por la posición de los interruptores $S1$ y $S2$ que funcionan de una manera complementaria, siendo $S1$ el interruptor principal.

2.6.1.1 Ganancia de voltaje del convertidor buck-boost KY tipo 1

Estado 1

En esta etapa el interruptor $S1$ está cerrado y $S2$ abierto. Durante este estado el diodo se polariza en inversa, mientras la fuente de voltaje V_{in} suministra energía a $L1$ y $C1$, por tanto $L1$ se magnetiza y $C1$ se carga. Además la fuente V_{in} junto con $C2$, suministran la energía a $L2$ y la carga R , lo que hace que $L2$ se magnetice y $C2$ se descargue. El circuito que describe el estado 1 se muestra en Fig. 2.20.

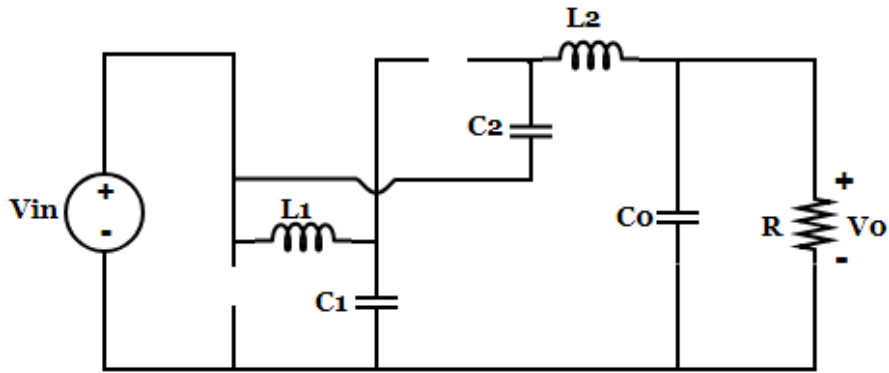


Fig. 2.20 Convertidor buck-boost KY con S1=on y S2=off

Estado 2

Durante esta etapa el interruptor S1 está abierto y S2 cerrado. En este estado el diodo se polariza en directa y la energía que esta almacenada en L1 y C1 es transferida a C2 y la carga R, por ende L1 y C1 se está descargando, mientras C2 se carga. El circuito asociado a este estado se muestra en la Fig. 2.21.

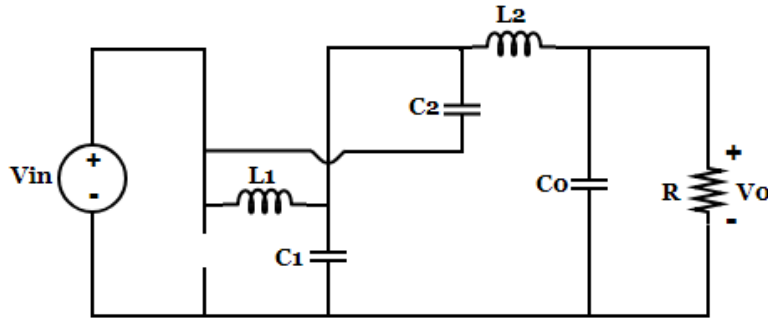


Fig. 2.21 Convertidor buck-boost KY con S1=off y S2=on

Aplicando sumatoria de voltajes en los circuitos equivalentes se obtiene:

$$(VL1)_{on - off} = V_{in} - VC1 \quad (2.54)$$

$$(VL2)_{on - off} = V_{in} + VC2 - V0 \quad (2.55)$$

$$(VL1)_{off - on} = -VC1 \quad (2.56)$$

$$(VL2)_{off - on} = VC2 - V0 \quad (2.57)$$

Reemplazando las ecuaciones anteriores en (1.4) y (1.5), resultan (2.58), (2.59), (2.60), (2.61)

$$(\Delta iL1)_{on - off} = \frac{(V_{in} - VC1)DT}{L1} \quad (2.58)$$

Análisis comparativo de diferentes topologías de convertidores buck-boost utilizando MatLab

$$(\Delta i_{L2})_{\text{on} - \text{off}} = \frac{(V_{\text{in}} + V_{C2} - V_o)DT}{L2} \quad (2.59)$$

$$(\Delta i_{L1})_{\text{off} - \text{on}} = \frac{(-V_{C1})(1 - D)T}{L1} \quad (2.60)$$

$$(\Delta i_{L2})_{\text{off} - \text{on}} = \frac{(V_{C2} - V_o)(1 - D)T}{L2} \quad (2.61)$$

Sustituyendo (2.58), (2.59), (2.60) y (2.61) en (1.6) y despejando la ganancia de voltaje para el modo buck, se halla (2.62)

$$\frac{V_o}{V_{\text{in}}} = 2D \quad (2.62)$$

Todos los convertidores buck-boost del tipo KY se caracterizan por tener una ganancia $2D$.

2.6.1.2 Cargabilidad del convertidor buck-boost KY tipo 1

Al contar con dos inductores, este convertidor cumple con la expresión (1.19). En consecuencia, la cargabilidad se obtiene mediante (2.63).

$$\frac{I_o}{I_{L1} + I_{L2}} = D \cdot G^{-1} \quad (2.63)$$

Al reemplazar la ganancia de voltaje en la ecuación anterior resulta (2.64), que es la expresión final de cargabilidad del convertidor representada por un valor constante.

$$\frac{I_o}{I_{L1} + I_{L2}} = 0.5 \quad (2.64)$$

2.6.2 Convertidor buck-boost KY tipo 2

El convertidor de Fig 2.22. está compuesto de cuatro interruptores de potencia, los cuales trabajan asincrónicamente, además cuenta con un diodo, un inductor, dos condensadores, una fuente de alimentación y una carga R . El voltaje a de salida de este convertidor es siempre positivo, al igual que el suministrado por la fuente de voltaje; sin embargo dicho voltaje de salida puede ser mayor o menor dependiendo el ciclo útil de trabajo D . Para un ciclo de trabajo $0 < D < 0.5$ el convertidor trabaja en modo buck o reductor, mientras que para un ciclo de trabajo $0.5 < D \leq 1$ el convertidor estará elevando el voltaje a la salida con respecto al de entrada, y de esta forma estaría trabajando en modo boost.

El convertidor buck-boost KY es utilizado en todas aquellas aplicaciones que requieran de bajas potencias [12].

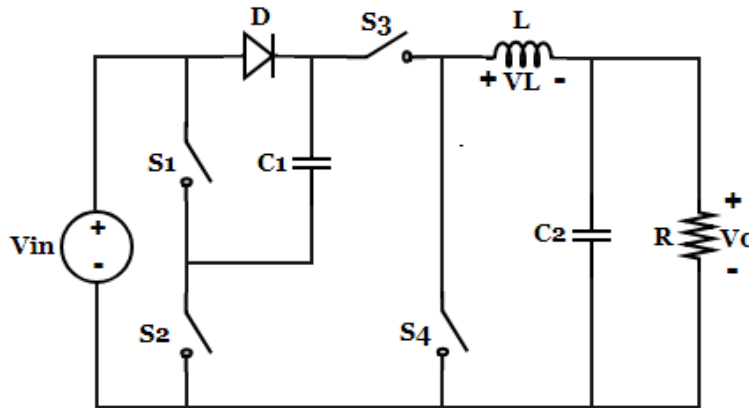


Fig. 2.22 Convertidor buck-boost KY tipo 2

Aplicando un procedimiento equivalente al del convertidor anterior se obtiene las ecuaciones de ganancia de voltaje y cargabilidad para el convertidor KY tipo 2, las cuales se indican a continuación.

$$\frac{V_o}{V_{in}} = 2D \quad (2.65)$$

$$\frac{I_o}{I_L} = 0.5 \quad (2.66)$$

2.7 Familia de convertidores buck-boost cuadráticos

2.7.1 Convertidor buck-boost cuadrático tipo 1

El convertidor cuadrático tipo 1, está constituido por dos inductores, dos condensadores, dos diodos, dos interruptores, una fuente de voltaje y una carga R. Este tipo de dispositivo es de fácil construcción y fácil control, además presenta un voltaje de salida positivo. El convertidor cuadrático es usado en todas aquellas aplicaciones industriales que requieran una alta ganancia de voltaje [13].

Este tipo de convertidor funciona tanto en modo buck, como modo boost. Para un ciclo de trabajo $D < 0.5$ se tiene a la salida un voltaje menor que el voltaje de entrada, y para $D > 0.5$ el voltaje a la salida es mayor que el voltaje de entrada. Este convertidor trabaja de una forma no inversora entregando un voltaje de salida de igual signo al voltaje con el que es alimentado el convertidor.

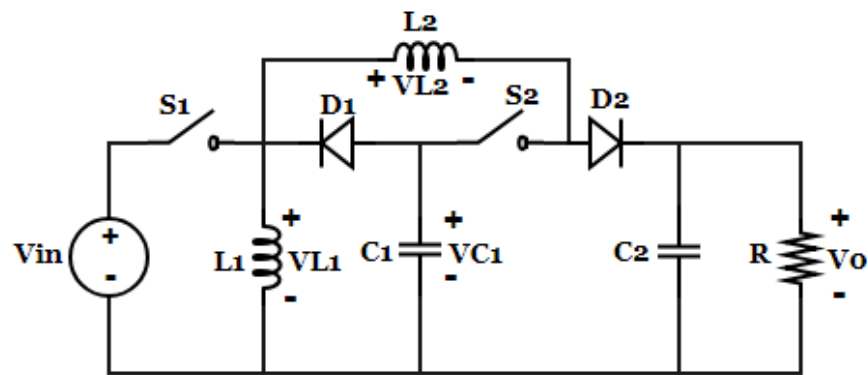


Fig. 2.23 Convertidor buck-boost cuadrático tipo 1

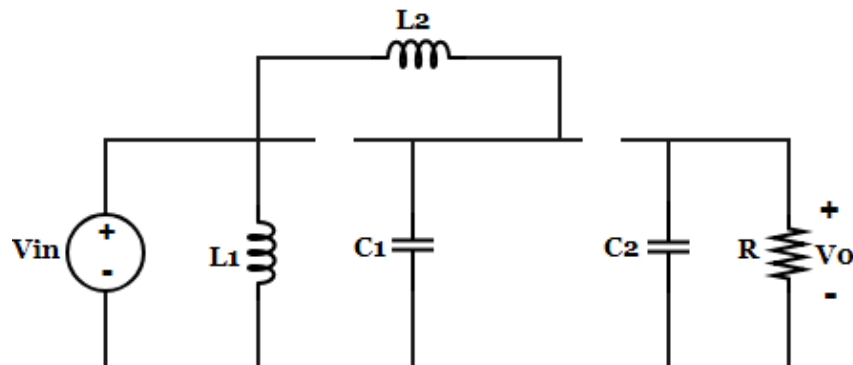
Principio de funcionamiento

El convertidor buck-boost cuadrático puede reducir o elevar el voltaje a la salida variando el ciclo de trabajo D de los interruptores S_1 y S_2 los cuales trabajan síncronamente en cada uno de sus dos estados. Estos estados son explicados a continuación.

2.7.1.1 Ganancia de voltaje del convertidor buck-boost cuadrático tipo 1

Estado 1

En esta etapa los interruptores S_1 y S_2 se cierran simultáneamente, como consecuencia D_1 y D_2 se polarizan en inversa abriendo partes del circuito. Al mismo tiempo los inductores L_1 y L_2 se están cargando, mientras los condensadores C_1 y C_2 están descargados. El circuito asociado a este estado se muestra en Fig. 2.24.

Fig. 2.24 Convertidor buck-boost cuadrático con $S_1=on$ $S_2=on$

Estado 2

Con los interruptores abiertos al mismo tiempo, la fuente de voltaje V_{in} se aísla del resto del circuito, además los diodos quedan polarizados en directa y tanto L_1 como L_2 se descargan, mientras los condensadores C_1 y C_2 se están cargando. El circuito equivalente que describe este estado se muestra en Fig. 2.25.

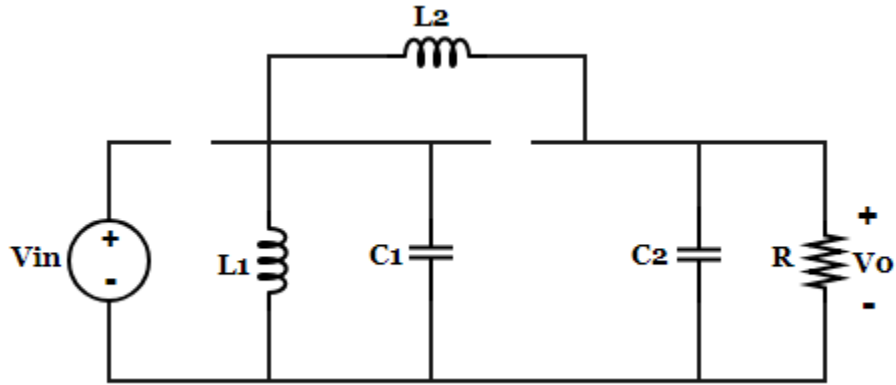


Fig. 2.25 Convertidor buck-boost cuadrático con S1=off S2=off

Aplicando sumatoria de voltajes en los circuitos equivalentes se obtiene:

$$V_{L1} = V_{in} \quad (2.67)$$

$$V_{L2} = V_{in} + V_{C1} \quad (2.68)$$

$$V_{L1} = -V_{C1} \quad (2.69)$$

$$V_{L2} = -V_{C1} - V_o \quad (2.70)$$

Reemplazando las ecuaciones anteriores en (1.4) y (1.5), resultan (2.71), (2.72), (2.73), (2.74)

$$(\Delta i_{L1})_{on - on} = \frac{(V_{in})DT}{L_1} \quad (2.71)$$

$$(\Delta i_{L2})_{on - on} = \frac{(V_{in} + V_{C1})DT}{L_2} \quad (2.72)$$

$$(\Delta i_{L1})_{off - off} = \frac{(-V_{C1})(1 - D)T}{L_1} \quad (2.73)$$

$$(\Delta i_{L2})_{off - off} = \frac{(-V_{in} - V_{C1})(1 - D)T}{L_2} \quad (2.74)$$

Sustituyendo (2.71), (2.72), (2.73) y (2.74) en (1.6) y despejando la ganancia de voltaje para el modo buck, se halla (2.75).

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{D^2}{(1 - D)^2} \quad (2.75)$$

2.7.1.2 Cargabilidad del convertidor buck-boost cuadrático tipo 1

De nuevo, al contar con dos inductores, este convertidor satisface la ecuación (1.10), Como consecuencia, la cargabilidad se obtiene mediante (2.76).

$$\frac{I_o}{I_{L1} + I_{L2}} = D \cdot G^{-1} \quad (2.76)$$

Sustituyendo la ganancia de voltaje en la expresión anterior se llega a (2.77), la cual representa la cargabilidad del convertidor.

$$\frac{I_o}{I_{L1} + I_{L2}} = D \cdot G^{-1} \quad (2.77)$$

2.7.2 Convertidor buck-boost cuadrático tipo 2

El convertidor mostrado en Fig. 2.26, está constituido por dos interruptores de potencia que pueden trabajar de una forma sincrona o asincrona, además, cuenta con dos dispositivos semiconductores como son los diodos, cuatro elementos almacenadores de energía, de los cuales dos son capacitores y los dos restantes son inductores, por último esta la fuente de alimentación y la carga R. El convertidor buck-boost cuadrático es utilizado en aplicaciones de pilas de combustible y sistemas fotovoltaicos[14].

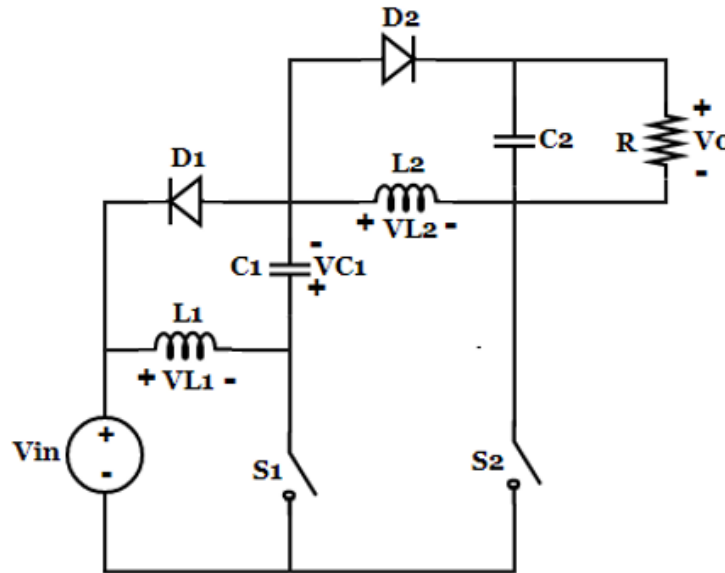


Fig. 2.26 Convertidor buck-boost cuadrático tipo 2

Aplicando un procedimiento equivalente al del convertidor anterior se obtiene las ecuaciones de ganancia de voltaje y cargabilidad para el convertidor cuadrático tipo 2, las cuales se indican a continuación.

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{(D^2)}{(1 - D)^2} \quad (2.78)$$

$$\frac{I_o}{I_L} = \frac{(1-D)^2}{D} \quad (2.79)$$

2.8 Familia de convertidores buck-boost bidireccionales

2.8.1 Convertidor buck-boost bidireccional tipo 1

Este convertidor está conformado por un inductor, un condensador, dos interruptores de potencia y dos fuentes de voltaje. Al contar con un bajo número de elementos, el convertidor bidireccional se torna liviano y con poco volumen. Este convertidor trabaja de una forma no inversora, además, garantiza una circulación del flujo de potencia bidireccionalmente debido a que no presenta elementos semiconductores como diodos que puedan llegar a aislar partes del circuito, lo que lo hace adecuado en aplicaciones de vehículos eléctricos [15].

Durante un periodo de conmutación completo el flujo de potencia puede circular de izquierda a derecha, de esta forma el convertidor está trabajando a en modo boost para todo $D < 1$, mientras que para un flujo que circula de derecha a izquierda el convertidor trabaja en modo buck para todo $D < 1$. El esquema general de este convertidor se muestra en Fig. 2.28.

El funcionamiento general de este convertidor se presenta en el esquema que se muestra en Fig. 2.27, y la Tabla 2.2, Posteriormente se dará un análisis más detallado:



Fig. 2.27 Esquema de funcionamiento del convertidor buck-boost bidireccional

Modo	Interruptor principal	Interruptor auxiliar	Sentido del flujo	Alimentación
Buck	S1	S2	2-1	V1
Boost	S2	S1	1-2	V2

Tabla 2.2 Esquema de control del convertidor bidireccional

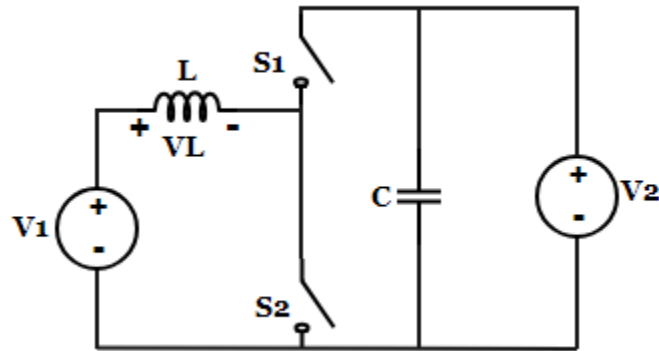


Fig. 2.28 Convertidor buck-boost bidireccional tipo 1

Principio de funcionamiento

En su forma general, el convertidor buck-boost bidireccional cuenta con dos fuentes de voltaje, V_1 y V_2 ; sin embargo, en cada modo de operación cada una de estas fuentes sale de funcionamiento y es reemplazada por una carga R . Los interruptores S_1 y S_2 funcionan de una forma complementaria en cada modo, sea buck o boost. En modo boost S_2 es el interruptor principal, mientras S_1 trabaja en forma auxiliar; ahora bien, la fuente de voltaje asociada a este modo de trabajo es V_1 ; mientras que para modo buck S_1 es el interruptor principal y S_2 el interruptor auxiliar, con la fuente de voltaje V_2 activa y la carga R ubicada en lugar de V_1 .

Funcionamiento en modo buck

En esta etapa se tiene una circulación del flujo de potencia de derecha a izquierda con la fuente V_2 activa. El circuito en este estado con su respectivo funcionamiento se muestra en Fig. 2.29.

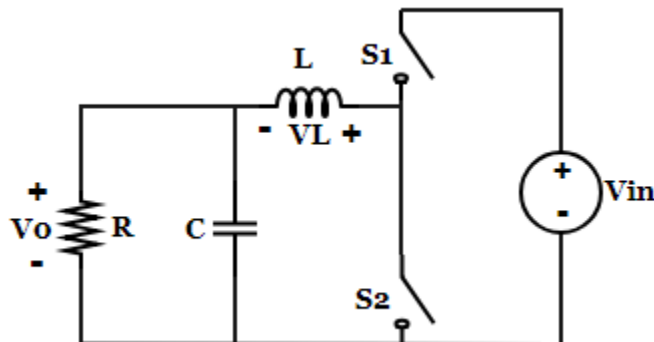


Fig. 2.29 Convertidor buck-boost bidireccional operando en modo buck

2.8.1.1. Ganancia de voltaje del convertidor buck-boost bidireccional tipo 1 (modo buck)

Estado 1

En esta etapa S1 está cerrado y S2 abierto. Durante este estado la fuente de voltaje queda conectada junto con el inductor y la carga. En este instante de tiempo el inductor está almacenando la energía, es decir, se está magnetizando. El circuito asociado a este estado se muestra en Fig. 2.30.

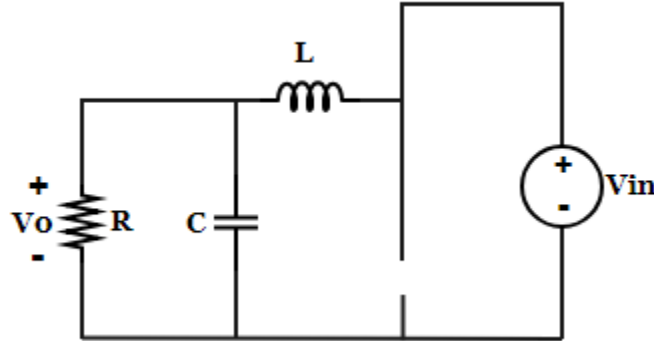


Fig. 2.30 Convertidor buck-boost bidireccional operando en modo buck con S1=on-S2=off

Estado 2

En esta etapa S1 está abierto y S2 cerrado. Durante este estado la fuente de voltaje se aísla del resto del circuito y el inductor queda conectado directamente a la carga, transfiriéndole así su energía, tal como se muestra en Fig. 2.31.

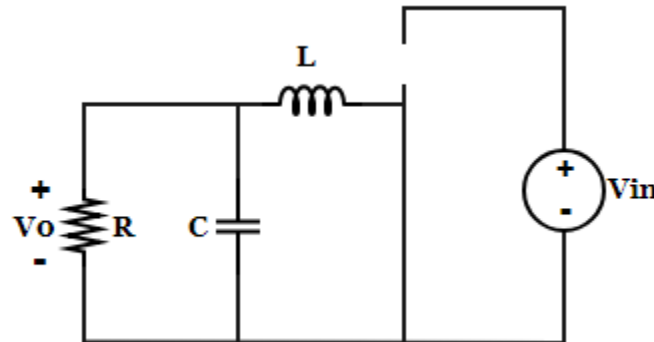


Fig. 2.31 Convertidor buck-boost bidireccional operando en modo buck con S1=off S2=on

Aplicando sumatoria de voltajes en los circuitos equivalentes se obtiene:

$$(VL)_{on - off} = V_{in} - V_o \quad (2.80)$$

$$(VL)_{off - on} = -V_o \quad (2.81)$$

Reemplazando las ecuaciones anteriores en (1.4) y (1.5), resultan (2.82), (2.83)

$$(\Delta iL)_{on - off} = \frac{(V_{in} - V_o)DT}{L} \quad (2.82)$$

$$(\Delta i_L)_{\text{off} - \text{on}} = \frac{(-V_0)(1 - D)T}{L} \quad (2.83)$$

Sustituyendo (2.82) y (2.83) en (1.6) y despejando la ganancia de voltaje para el modo buck, se halla (2.84)

$$\frac{V_o}{V_{in}} = D \quad (2.84)$$

Funcionamiento en modo boost

Durante este estado, el flujo de potencia circula de izquierda a derecha con la fuente de voltaje V_1 alimentando el circuito. El equivalente asociado a este modo de operación se muestra en Fig. 2.32.

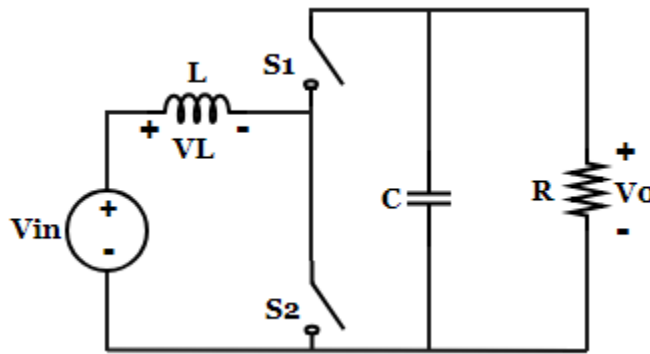


Fig. 2.32 Convertidor buck-boost bidireccional operando en modo boost

2.8.1.2. Ganancia de voltaje del convertidor buck-boost bidireccional tipo 1 (modo boost)

Estado 1

En esta etapa S_1 está abierto y S_2 cerrado. Durante este estado la fuente de voltaje queda directamente conectada al inductor, por consiguiente el inductor se está magnetizando. El circuito equivalente que obedece a la posición de los interruptores se muestra en Fig. 2.33.

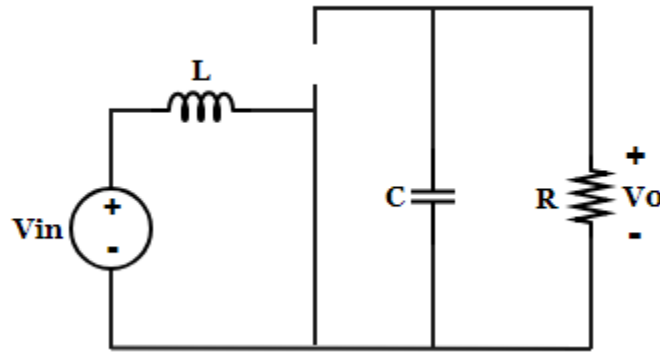


Fig. 2.33 Convertidor buck-boost bidireccional operando en modo boost con S1=off S2=on

Estado 2

En esta etapa S1 está cerrado y S2 abierto. Durante este estado la fuente de voltaje queda conectada al inductor y a la carga R. El circuito que representa este estado se muestra en Fig. 2.34

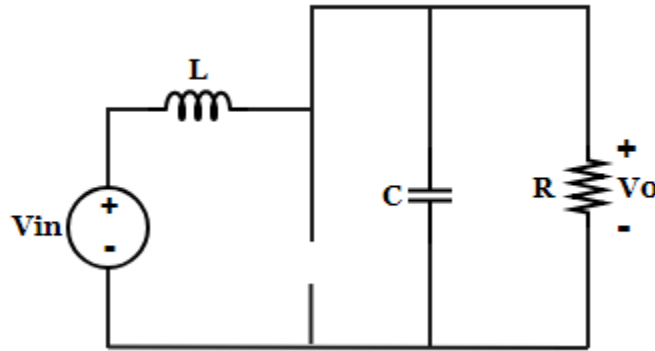


Fig. 2.34. Convertidor buck-boost bidireccional operando en modo boost con S1=on S2=off

Aplicando sumatoria de voltajes en los circuitos equivalentes se obtiene:

$$V_L = V_{in} \quad (2.85)$$

$$V_L = V_{in} - V_o \quad (2.86)$$

Reemplazando las ecuaciones anteriores en (1.4) y (1.5), resultan (2.87), (2.88)

$$(\Delta i_L)_{\text{off} - \text{on}} = \frac{(V_{in})DT}{L} \quad (2.87)$$

$$(\Delta i_L)_{\text{on} - \text{off}} = \frac{(V_{in} - V_o)(1 - D)T}{L} \quad (2.88)$$

Sustituyendo (2.87) y (2.88) en (1.6) y despejando la ganancia de voltaje para el modo boots, se halla (2.89)

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1 - D} \quad (2.89)$$

2.8.1.3. Cargabilidad del convertidor buck-boost bidireccional tipo 1

Cuando el convertidor trabaja en modo buck, este convertidor satisface la expresión (1.10), de esta forma es posible obtener la cargabilidad mediante (2.90).

$$\frac{I_o}{I_L} = D \cdot G^{-1} \quad (2.90)$$

Reemplazando la ganancia de voltaje en la ecuación anterior se llega a (2.91), que representa la cargabilidad del convertidor en modo de trabajo buck.

$$\frac{I_o}{I_L} = 1 \quad (2.91)$$

En modo de operación boost, la ecuación a utilizar es (1.9). En consecuencia, la cargabilidad se obtiene mediante (2.92).

$$\frac{I_o}{I_L} = G^{-1} \quad (2.92)$$

Al reemplazar la ganancia de voltaje en la ecuación anterior resulta (2.93), que es la expresión final de cargabilidad del convertidor en modo boost.

$$\frac{I_o}{I_L} = (1 - D) \quad (2.92)$$

2.8.2. Convertidor buck-boost bidireccional tipo 2

El circuito de Fig. 2.35, está compuesto por tres interruptores de potencia, donde S1 es el interruptor principal y S2 y S3 son los interruptores que conmutan de manera complementaria para modo buck y para modo boost, además, este convertidor cuenta con un diodo, dos condensadores, un inductor y dos fuentes de voltaje, V1 y V2. Sin embargo, las dos fuentes de voltaje no están en funcionamiento al mismo tiempo, ya que todo convertidor requiere de una carga que demande potencia, por lo tanto, cuando el convertidor trabaja en modo buck la fuente V2 permanece activa, mientras que V1 es reemplazada por una carga R. De igual forma ocurre para el modo boost, pero esta vez la fuente V1 está activa y V2 es reemplazada por una carga R. El convertidor bidireccional puede trabajar en modo buck o modo boost

durante un periodo completo. Este convertidor es usado en aplicaciones de carga y descarga de baterías [16].

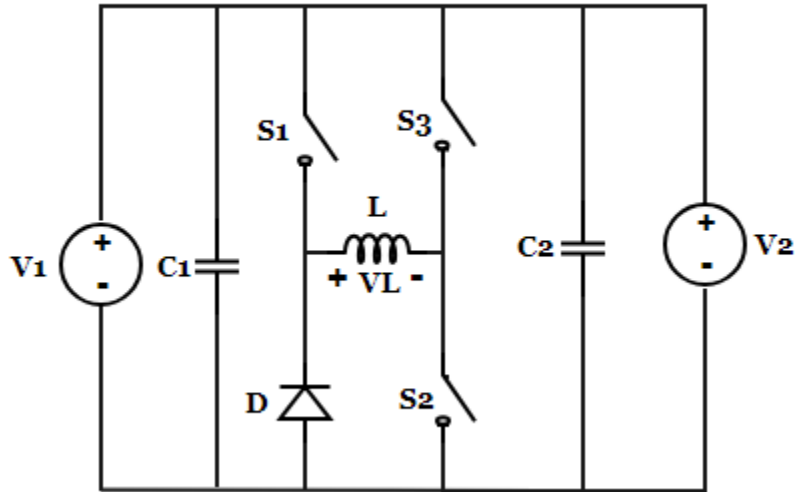


Fig. 2.34 Convertidor buck-boost bidireccional tipo 2

Aplicando un procedimiento equivalente al del convertidor anterior se obtiene las ecuaciones de ganancia de voltaje y cargabilidad en los modos buck y boost para el convertidor bidireccional tipo 2, las cuales se indican a continuación.

Ganancia de voltaje en modo buck

$$\frac{V_o}{V_{in}} = D \quad (2.93)$$

Ganancia de voltaje en modo boost

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1 - D} \quad (2.94)$$

Cargabilidad en modo buck

$$\frac{I_o}{I_L} = 1 \quad (2.95)$$

Cargabilidad en modo boost

$$\frac{I_o}{I_L} = 1 - D \quad (2.96)$$

2.9. Familia de convertidores ZVT

2.9.1. Convertidor buck-boost ZVT tipo 1

El convertidor ZVT (transición de voltaje de cero) está constituido por tres inductores, un condensador, dos interruptores de potencia, dos diodos, una fuente de voltaje y una resistencia. Al presentar una conmutación suavizada las pérdidas en el circuito disminuyen, aumentando así la eficiencia del mismo. Al igual que el convertidor de un interruptor, el convertidor ZVT trabaja de una forma inversora, entregando así un voltaje de salida negativo. Este tipo de dispositivo es usado en aplicaciones de vehículos eléctricos [17].

Por otro lado, este convertidor puede trabajar en modo buck, y modo boost al variar su ciclo de trabajo D . Para un ciclo de trabajo $D < 0.5$, se tiene a la salida un voltaje menor que a la entrada y para $D > 0.5$ el voltaje a la salida es mayor que a la entrada. Este convertidor trabaja de una forma inversora, entregando un voltaje de salida de signo opuesto al voltaje de entrada. El circuito que representa esta topología se muestra en Fig. 2.36.

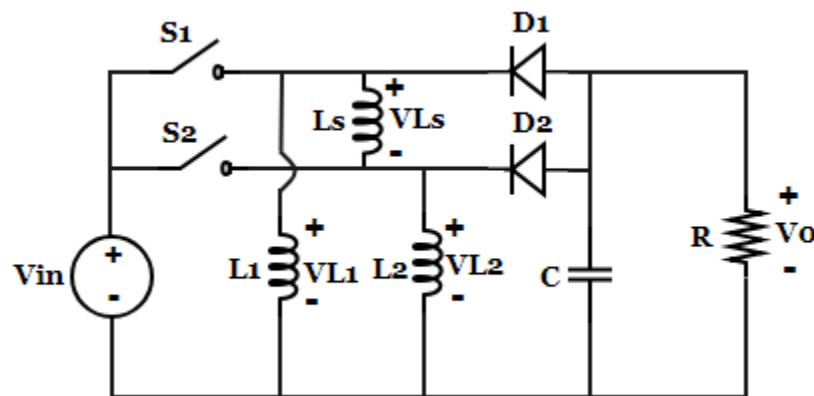


Fig. 2.35 Convertidor buck-boost ZVT tipo 1

.Principio de funcionamiento

El convertidor buck-boost ZVT puede reducir o elevar el voltaje de salida con respecto al de entrada de una forma inversora a través de la conmutación síncrona de los interruptores $S1$ y $S2$. Sin embargo los interruptores también pueden operar de una forma complementaria, pero en el presente análisis se sigue un esquema de conmutación simultánea en cada uno de sus dos estados.

2.9.1.1. Ganancia de voltaje del convertidor buck-boost ZVT tipo 1

Estado 1

Durante esta etapa de la conmutación tanto $S1$ como $S2$ están cerrados, por tanto los diodos $D1$ y $D2$ quedan polarizados inversamente, causando que el circuito se divida en dos partes; además los tres inductores que están siendo alimentados por la fuente de voltaje V_{in} se están magnetizando, mientras que el condensador C está descargado. El circuito equivalente que describe este estado se muestra en Fig.2.37.

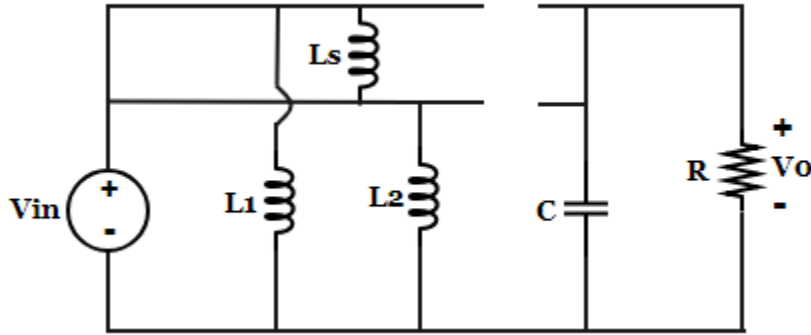


Fig. 2.36 Convertidor buck-boost ZVT con S1=on y S2=on

Estado 2

Durante este estado los interruptores S1 y S2 conmutan a la apertura, consiguiendo así que la fuente se aislé del resto del circuito, y que los diodos D1 y D2 queden polarizados en directa, además, los tres inductores están en el proceso de desmagnetización, mientras el condensador C se está cargando. El circuito equivalente asociado a este estado se muestra en Fig.2.38.

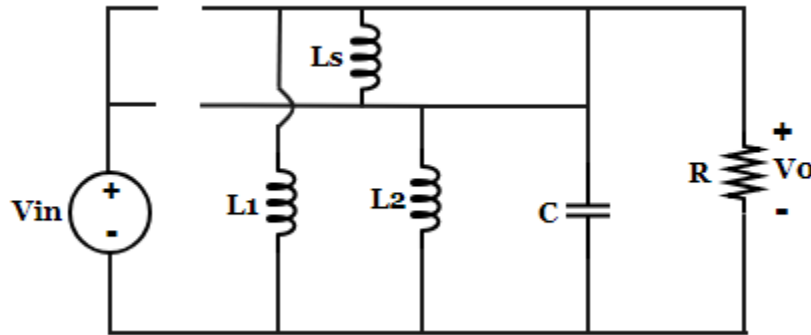


Fig. 2.37 Convertidor buck-boost ZVT con S1=off y S2=off

Aplicando sumatoria de voltajes en los circuitos equivalentes se obtiene:

$$(VL1)_{on} - on = V_{in} \quad (2.97)$$

$$(VL1)_{on} - on = VL_s + VL_2 \quad (2.98)$$

$$(VL1)_{off} - off = V_o \quad (2.99)$$

$$(VL1)_{off} - off = VL_s + VL_2 \quad (2.100)$$

$$VL_s = 0 \quad (2.101)$$

Reemplazando las ecuaciones anteriores en (1.4) y (1.5), resultan (2.102), (2.103)

$$(\Delta i_{L1})_{on} - on = \frac{(V_{in})DT}{L1} \quad (2.102)$$

$$(\Delta i_{L1})_{off} - off = \frac{(V_{in})DT}{L1} \quad (2.103)$$

Sustituyendo (2.102) y (2.103) en (1.6) y despejando la ganancia de voltaje, se halla (2.104)

$$\frac{V_o}{V_{in}} = -\frac{D}{(1-D)} \quad (2.104)$$

2.9.1.2 Cargabilidad del convertidor buck-boost ZVT tipo 1

Este convertidor está conformado por varios inductores, por tanto se recurre a (1.10), con dicha expresión se puede obtener la cargabilidad del convertidor tal como se muestra en (2.105).

$$\frac{I_o}{I_{L1} + I_{L2}} = D \cdot G^{-1} \quad (2.105)$$

Al reemplazar la ganancia de voltaje en la ecuación anterior se llega a la expresión indicada en (2.106), la cual corresponde a la cargabilidad del convertidor.

$$\frac{I_o}{I_{L1} + I_{L2}} = -(1-D) \quad (2.106)$$

2.9.2 Convertidor buck-boost ZVT tipo 2

El convertidor mostrado en Fig. 2.39. es quizás el circuito que tiene un mayor número de elementos en comparación con los otros convertidores buck-boost. Este dispositivo cuenta con dos interruptores de potencia que trabajan de una forma alternada, además, tiene tres condensadores, cinco inductores y dos fuentes de voltaje, V1 y V2, las cuales trabajan según el modo en que este funcionando el convertidor, es decir, si el convertidor está trabajando en modo buck, la fuente que está habilitada sería V2, mientras que V1 es reemplazada por una carga R. Para modo boost, la fuente V1 está activa, y al mismo tiempo V2 es reemplazada por una carga R. El convertidor ZVT puede trabajar en modo buck durante un periodo de tiempo completo, manipulando el ciclo útil de trabajo D, de igual forma sucede para el modo boost.

Este tipo de dispositivo es usado en aplicaciones de banco de baterías y vehículos eléctricos [15].

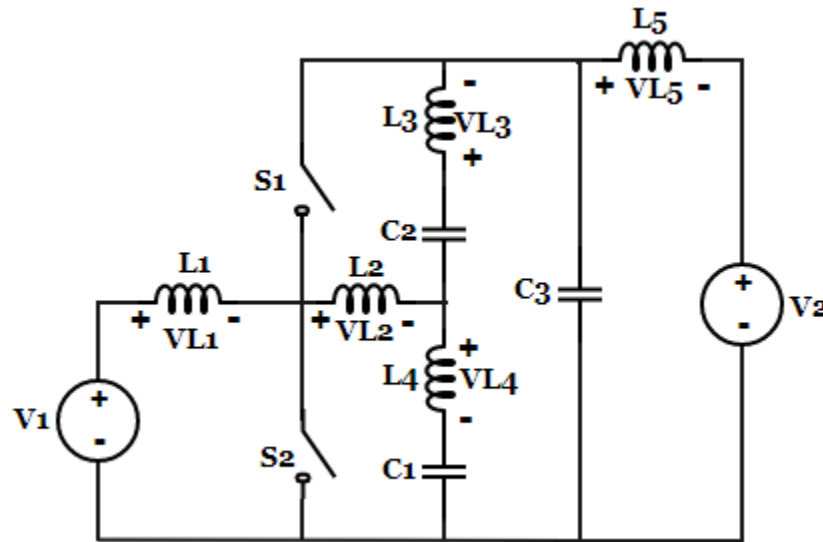


Fig. 2.38 Convertidor buck-boost ZVT tipo 2

Ganancia de voltaje en modo buck

$$\frac{V_o}{V_{in}} = D \quad (2.107)$$

Ganancia de voltaje en modo boost

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1 - D} \quad (2.108)$$

Cargabilidad en modo buck

$$\frac{I_o}{I_L} = 1 \quad (2.109)$$

Cargabilidad en modo boost

$$\frac{I_o}{I_L} = 1 - D \quad (2.110)$$

2.10. Familia de convertidores buck-boost aislados

2.10.1 Convertidor buck-boost aislado tipo 1

La topología del convertidor aislado está compuesta de dos elementos almacenadores de energía (inductor, condensador), un dispositivo de conmutación (semiconductor de potencia), un diodo, el cual se asume ideal, es decir, que no consume potencia y no presenta una caída de tensión en sus terminales,

también una carga resistiva, un transformador y una fuente DC. A continuación en Fig.2.40, se muestra el convertidor aislado. Este convertidor es usado en aplicaciones de vehículos eléctricos [18].

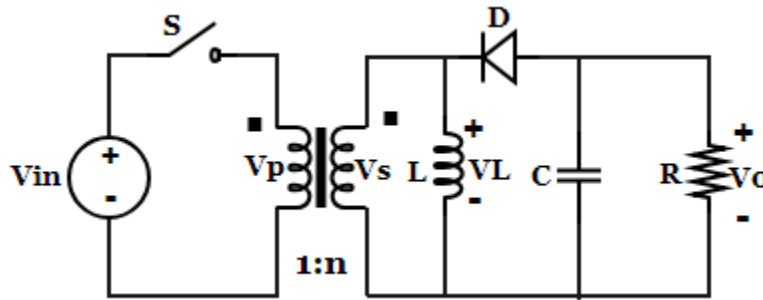


Fig. 2.39 Convertidor buck-boost aislado tipo 1

Principio de funcionamiento

Para efectos de simplicidad en el análisis del circuito de la Fig. 2.40. El transformador se considera ideal y con relación de transformación 48: 48, esto garantiza que el transformador solo proporcionara un aislamiento entre la alimentación y la carga.

El transformador se asume ideal, esto garantiza que no hay pérdidas en el núcleo, las capacidades parásitas son nulas, la permeabilidad en el núcleo y la resistencia en los devanados es igual a cero.

Relacion de transformacion:

$$n = \frac{V_1}{V_2} \quad (2.111)$$

$$V_2 = \frac{V_1}{n} \quad (2.112)$$

Para efectos de simplicidad se asume $V_1=V_2=48$

$$a = \frac{48}{48} = 1 \quad (2.113)$$

Este convertidor también puede variar el voltaje a la salida ya sea presentando un voltaje mayor o menor que el voltaje de alimentación. Estos voltajes se obtienen variando el ciclo de trabajo. Si $D > 0.5$ el voltaje a la salida es mayor que el voltaje de alimentación, en este caso el convertidor estará operando en modo boost. Si el ciclo de trabajo es $D < 0.5$, el voltaje de salida respecto al voltaje de alimentación es menor, entonces se dice que el convertidor está trabajando en modo buck.

2.10.1.1. Ganancia de voltaje del convertidor buck-boost aislado tipo 1

Estado 1

Análisis comparativo de diferentes topologías de convertidores buck-boost utilizando MatLab

En esta etapa, $S=on$. Con el interruptor en este estado, el voltaje de la fuente es el mismo que el voltaje en el lado primario del transformador, durante este periodo el inductor L se está cargando, ya que el diodo se polariza en inversa. En Fig. 2.41. se observa el circuito equivalente del convertidor con el interruptor en estado on.

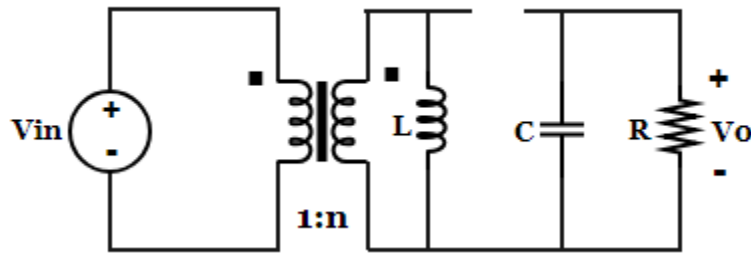


Fig. 2.40 Convertidor buck-boost aislado con $S=on$

Estado 2

En esta etapa, $S=off$. Durante este estado, la carga y el condensador están en paralelo con el inductor ya que el diodo se polariza en directa. En Fig. 2.42. se observa el circuito equivalente del convertidor con el interruptor en estado off.

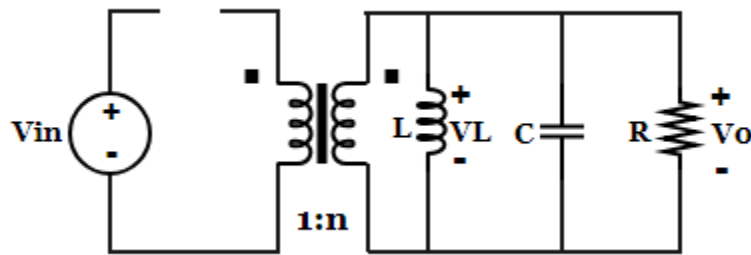


Fig. 2.41 Convertidor buck-boost aislado con $S=off$.

Aplicando sumatoria de voltajes en los circuitos equivalentes se obtiene:

$$(V_L)_{on} = V_1 = V_2 = V_{in} \quad (2.114)$$

$$(V_L)_{off} = V_o \quad (2.115)$$

Reemplazando las ecuaciones anteriores en (1.4) y (1.5), resultan (2.116), (2.117)

Análisis comparativo de diferentes topologías de convertidores buck-boost utilizando MatLab

$$(\Delta i_L)_{on} = \frac{V_{in} D T}{L} \quad (2.116)$$

$$(\Delta i_L)_{off} = \frac{V_o(1 - D)T}{L} \quad (2.117)$$

Reemplazando (2.116) y (2.117) en (1.6) y despejando la ganancia de voltaje, se halla (2.118)

$$\frac{V_o}{V_{in}} = -\frac{D}{(1 - D)} \quad (2.118)$$

2.10.1.2. Cargabilidad del convertidor buck-boost aislado tipo 1

Este convertidor buck-boost aislado cumple con la expresión (1.8), por tanto, la cargabilidad es obtenida mediante (2.119)

$$\frac{I_o}{I_L} = D \cdot G^{-1} \quad (2.119)$$

Reemplazando la ganancia de voltaje del convertidor se llega a la ecuación (2.120), que corresponde a la cargabilidad del convertidor.

$$\frac{I_o}{I_L} = (1 - D) \quad (2.120)$$

2.10.2 Convertidor buck-boost aislado tipo 2

En convertidor que se muestra en Fig. 2.43, es producto de la conexión en cascada de un convertidor buck con un convertidor boost, este circuito resultante cuenta con dos interruptores de potencia que pueden trabajar simultáneamente, además, cuenta dos dispositivos semiconductores (diodos), un condensador, un inductor, una fuente de alimentación, una carga R, y un transformador de voltaje de relación 1:n. El voltaje suministrado a la salida puede ser mayor o menor que el voltaje de entrada, pero de signo opuesto. Para un ciclo de trabajo D menor a 0.5 y mayor a 0, el convertidor trabaja en modo buck o reductor, y para un ciclo de trabajo D mayor a 0.5 y menor a 1, el convertidor trabaja en modo boost o elevador. La ganancia del convertidor puede quedar en función de n, siempre y cuando la relación de transformación sea diferente de 1:1, sin embargo se tiene que ejercer cierto control sobre el ciclo de trabajo de los interruptores. El convertidor buck-boost aislado es usado en aplicaciones de energías renovables y descarga de baterías [19].

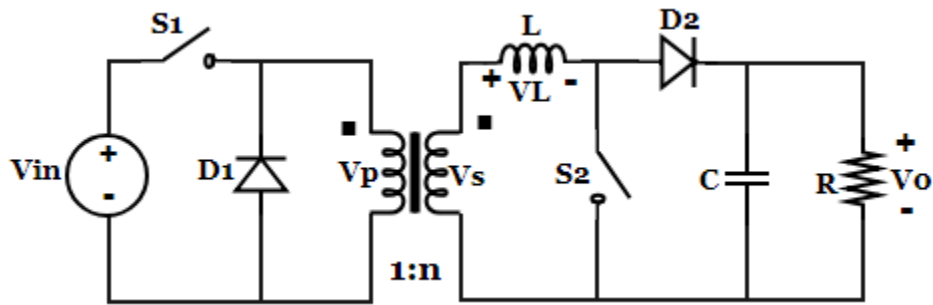


Fig. 2.42 Convertidor buck-boost aislado tipo 2

Aplicando un procedimiento equivalente al del convertidor anterior se obtiene las ecuaciones de ganancia de voltaje y cargabilidad para el convertidor aislado tipo 2.

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{D}{1 - D} \quad (2.121)$$

$$\frac{I_o}{I_L} = 1 - D \quad (2.122)$$

2.11 Resumen de topologías buck-boost

En la Tabla 2.3. Se muestra el resumen de las ecuaciones de ganancia de voltaje y cargabilidad de las familias de convertidores buck-boost. Todas estas ecuaciones son dadas en función del ciclo útil de trabajo D . En cuanto a cargabilidad, es importante mencionar para algunos convertidores es constante, esto se debe a la ganancia de voltaje de cada circuito.

Convertidor n°	Figura	Familia	Nombre	Modo de operación	Ganancia de voltaje	Cargabilidad
1	1.5	Buck-Boost de un interruptor [2]	Clásico	Buck-Boost	$-\frac{D}{1 - D}$	$-(1 - D)$
2	2.1-2.4	Buck-Boost Un interruptor [3][4]	Tipo 1	Buck-Boost	$\frac{(2D - D^2)}{(1 - D)^2}$	$\frac{(1 - D)^2}{(2 - D)}$
			Tipo 2	Buck-Boost	$\frac{2D}{1 - D}$	$\frac{1 - D}{2}$

Convertidor n°	Figura	Familia	Nombre	Modo de operación	Ganancia de voltaje	Cargabilidad
3	2.5-2.9	Buck-Boost con acoplamiento magnético [5][6]	Tipo 1	Buck-Boost	$-\frac{D}{1-D}$	$-(1-D)$
			Tipo 2	Buck-Boost	$\frac{D}{1-D}$	$\frac{1-D}{D}$
4	2.11-2.14	Buck-Boost Dos interruptores [7][8]	Tipo 1	Buck-Boost	$\frac{D}{1-D}$	$1-D$
			Tipo 2	Buck-Boost	$\frac{D}{1-D}$	$1-D$
5	2.15-2.18	Buck-Boost Cuatro interruptores [9][10]	Tipo 1	Buck	D	1
				Boost	$\frac{1}{1-D}$	$1-D$
			Tipo 2	Buck	D	1
				Boost	$\frac{1}{1-D}$	$1-D$
6	2.19-2.22	Buck-Boost KY [11][12]	Tipo 1	Buck-Boost	$2D$	0.5
			Tipo 2	Buck-Boost	$2D$	0.5
7	2.23-2.26	Buck-Boost Cuadrático [13][14]	Tipo 1	Buck-Boost	$\frac{(D^2)}{(1-D)^2}$	$\frac{(1-D)^2}{D}$
			Tipo 2	Buck-Boost	$\frac{(D^2)}{(1-D)^2}$	$\frac{(1-D)^2}{D}$
8	2.28-2.35	Buck-Boost Bidireccional [15][16]	Tipo 1	Buck	D	1
				Boost	$\frac{1}{1-D}$	$1-D$
			Tipo 2	Buck	D	1
				Boost	$\frac{1}{1-D}$	$1-D$

Convertidor n°	Figura	Familia	Nombre	Modo de operación	Ganancia de voltaje	Cargabilidad
9	2.36-2.39	Buck-Boost ZVT [17][15]	Tipo 1	Buck-Boost	$-\frac{D}{1-D}$	$-(1-D)$
			Tipo 2	Buck	D	1
				Boost	$\frac{1}{1-D}$	$1-D$
10	2.40-2.43	Buck-Boost Aislado [18][19]	Tipo 1	Buck-Boost	$\frac{D}{1-D}$	$-(1-D)$
			Tipo 2	Buck-Boost	$\frac{D}{1-D}$	$1-D$

Tabla 2.3 Resumen de topologías buck-boost

Se puede observar ciertas topologías que presentan ganancia negativa, como lo son, la topología clásica de un interruptor, con acoplamiento magnético tipo 1, y ZVT tipo 1, esto se traduce en que el voltaje a la salida es de signo opuesto al voltaje de alimentación. Estos convertidores se les conoce como inversores.

El orden de los convertidores esta dado exclusivamente por el número de elementos almacenadores de energía (C-L). Los convertidores estudiados oscilan entre 2° y 8° orden, siendo el convertidor ZVT tipo 2 el que presenta mayor orden.

2.11.1. Análisis de ganancia de voltaje

Uno de los parámetros importantes para el estudio de un convertidor es la ganancia de voltaje, ya que con este se puede dimensionar el tamaño de la conversión de energía. En la tabla 2.4. se muestra diferentes valores de ganancia acorde al ciclo útil de trabajo.

Convertidor / Ciclo de trabajo D		Ganancia de voltaje									
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.99
1	Buck-Boost clásico [2]	0.11	0.25	0.43	0.66	1	1.5	2.3	4	9	99
2	^l Buck-Boost de un interruptor tipo 1 [3]	0.23	0.56	1.04	1.7	3	5.25	10.11	24	99	9999
3	Buck-Boost de un interruptor tipo 2 [4]	0.11	0.25	0.43	0.66	1	1.5	2.3	4	9	99
4	Buck-Boost con acoplamiento magnético tipo 1 [5]	0.11	0.25	0.43	0.66	1	1.5	2.3	4	9	99
5	Buck-Boost con acoplamiento magnético tipo 2 [6]	0.11	0.25	0.43	0.66	1	1.5	2.3	4	9	99

Análisis comparativo de diferentes topologías de convertidores buck-boost utilizando MatLab

Convertidor / Ciclo de trabajo D			Ganancia de voltaje									
			0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.99
6	Buck-Boost de dos interruptores tipo 1 [7]		0.11	0.25	0.43	0.66	1	1.5	2.3	4	9	99
7	Buck-Boost de dos interruptores tipo 2 [8]		0.11	0.25	0.43	0.66	1	1.5	2.3	4	9	99
8	Buck-Boost de cuatro interruptores tipo 1 [9]	Modo buck	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.99
		Modo boost	1.11	1.25	1.43	1.6	2	2.5	3.3	5	10	100
9	Buck-Boost cuatro interruptores tipo 2 [10]	Modo buck	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.99
		Modo Boost	1.11	1.25	1.43	1.6	2	2.5	3.3	5	10	100
10	Buck-Boost KY tipo 1 [11]		0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	1.98
11	Buck-Boost KY tipo 2 [12]		0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	1.98
12	Buck-Boost cuadrático tipo 1 [13]		0.01	0.06	0.18	0.44	1	2.25	5.4	16	81	9801
13	Buck-Boost cuadrático tipo 2 [14]		0.01	0.06	0.18	0.44	1	2.25	5.4	16	81	9801
14	Buck-Boost bidireccional tipo 1 [15]	Modo buck	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.99
		Modo boost	1.11	1.25	1.43	1.6	2	2.5	3.3	5	10	100
15	Buck-Boost bidireccional tipo 2 [16]	Modo buck	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.99
		Modo boost	1.11	1.25	1.43	1.6	2	2.5	3.3	5	10	100
16	Buck-Boost ZVT tipo 1 [17]		0.11	0.25	0.43	0.66	1	1.5	2.3	4	9	99
17	Buck-Boost ZVT tipo 2 [15]	Modo Buck	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.99
		Modo boost	1.11	1.25	1.43	1.6	2	2.5	3.3	5	10	100
18	Buck-Boost aislado tipo 1 [18]		0.11	0.25	0.43	0.66	1	1.5	2.3	4	9	99
19	Buck-Boost aislado tipo 2 [20]		0.11	0.25	0.43	0.66	1	1.5	2.3	4	9	99

Tabla 2.4 Análisis de ganancia de voltaje de convertidores buck-boost

En la tabla anterior se puede observar que hay convertidores que presentan mejor ganancia de voltaje en modo buck que en modo boost y viceversa.

El convertidor KY presenta la mejor ganancia en modo buck, mientras que en modo boost, el convertidor cuadrático es el que tiene mayor ganancia de voltaje.

Un caso particular de los convertidores buck-boost, son el convertidor de un interruptor tipo 1 y tipo 2, los cuales trabajan en modo buck hasta un ciclo D menor al 30%, y para valores de D mayores a este operan en modo boost, presentando ganancias demasiado altas en comparación con los otros convertidores.

2.11.1.1. Grafica de ganancias

La relación de voltaje de salida con respecto al voltaje de entrada es diferente en muchos convertidores. Muchos de estos dispositivos tienen un comportamiento de ganancia lineal; otros por el contrario, cuentan con una ganancia que presenta un comportamiento exponencial, ya sea creciente o decreciente.

En Fig. 2.44 se muestra las formas de onda correspondiente a la ganancia de voltaje de todas las familias de convertidores buck-boost. Es importante resaltar que muchos convertidores tienen la misma ecuación de ganancia de voltaje, por lo que la forma de onda asociada es la misma.

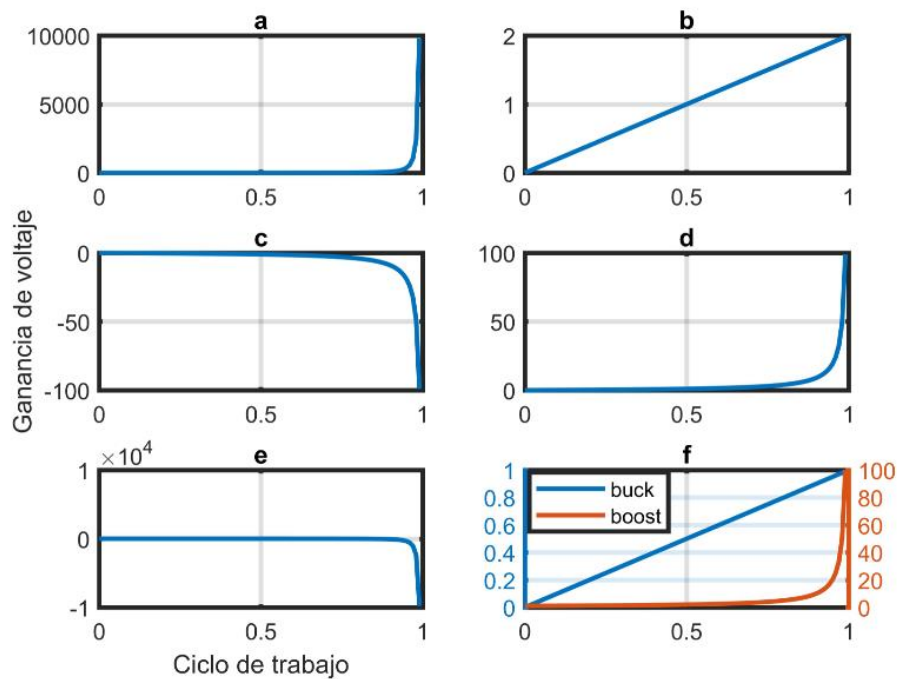


Fig. 2.43 Ganancia de voltaje en convertidores buck-boost. (a) convertidor cuadrático tipo 1 y tipo 2. (b) Convertidor KY tipo 1 y tipo 2. (c) Convertidor de un solo interruptor clásico, con acoplamiento magnético tipo 1, ZVT tipo 1, aislado tipo 1. (d) convertidor con acoplamiento magnético tipo 2, de dos interruptores tipo 1 y tipo 2, un interruptor tipo 2. Aislado tipo 2 un interruptor tipo 2. (e) convertidor de un interruptor tipo 1. (f) convertidor de cuatro interruptores tipo 1 y tipo 2, bidireccional tipo 1 y tipo 2, ZVT tipo 2.

2.11.2. Análisis de cargabilidad

En la Tabla 2.5. Se muestra el estudio de cargabilidad para diferentes topologías buck-boost. Se escoge una potencia arbitraria de 80W. Esta potencia es demandada por cargas resistivas de $10\ \Omega$ y $150\ \Omega$. Asociado a la carga y a la potencia de cada convertidor, hay un ciclo de trabajo y un voltaje, tal como se muestra a continuación.

Convertidor	Carga(Ω)	Ciclo de trabajo(D)	Voltaje de salida(Voltios)	Cargabilidad (io/iL)
Buck-Boost Análisis comparativo de diferentes topologías de convertidores buck-boost utilizando Matlab	10	0.3707	28.28	54
Buck-Boost Un interruptor tipo 1 [3]	10	0.2067	28.28	0.350
Buck-Boost con acoplamiento magnético tipo 1 [5]	150	0.6953	109.55	-0.3047
Buck-Boost Dos interruptores tipo 1 [7]	10	0.3707	28.28	0.6293
Buck-Boost de cuatro interruptores tipo 1 [9]	10	0.5891	28.28	1
Buck-Boost KY tipo 1 [11]	10	0.2945	28.28	0.5
Buck-Boost Cuadrático tipo 1 [13]	150	0.6019	109.55	0.263
Buck-Boost Bidireccional tipo 1 [15]	10	0.5891	28.28	1
Buck-Boost ZVT tipo 1 [17]	10	0.3707	28.28	-0.6293
Buck-Boost Aislado tipo 1 [18]	10	0.3707	28.28	-0.6293
Buck-Boost un interruptor tipo 2 [4]	10	0.2275	28.28	0.3862
Buck-Boost Acoplamiento magnético tipo 2 [6]	10	0.3707	28.28	1.6975
Buck-Boost de Dos interruptores tipo 2 [8]	10	0.3707	28.28	0.6293

Convertidor	Carga(Ω)	Ciclo de trabajo(D)	Voltaje de salida(Voltios)	Cargabilidad (i_o/i_L)
Buck-Boost Cuatro interruptores tipo 2 [10]	150	0.5618	109.55	0.4382
Buck-Boost KY tipo 2 [12]	10	0.2945	28.28	0.5
Buck-Boost Cuadrático tipo 2 [14]	150	0.6019	109.55	0.263
Buck-Boost Bidireccional tipo 2 [16]	10	0.5891	28.28	1
Buck-Boost ZVT tipo 2 [15]	10	0.5891	28.28	1
Buck-Boost Aislado tipo 2 [19]	10	0.3707	28.28	0.6293

Tabla 2.5 Análisis de cargabilidad en convertidores buck-boost

2.11.2.1. Gráficas de cargabilidad

La relación de la corriente media en la fuente con respecto a la corriente media en los inductores puede tener comportamientos lineales o exponenciales, dependiendo de la ganancia de voltaje asociada a cada convertidor o el número de inductores. En Fig. 2.45, Se muestra la cargabilidad de cada una de las familias de convertidores buck-boost.

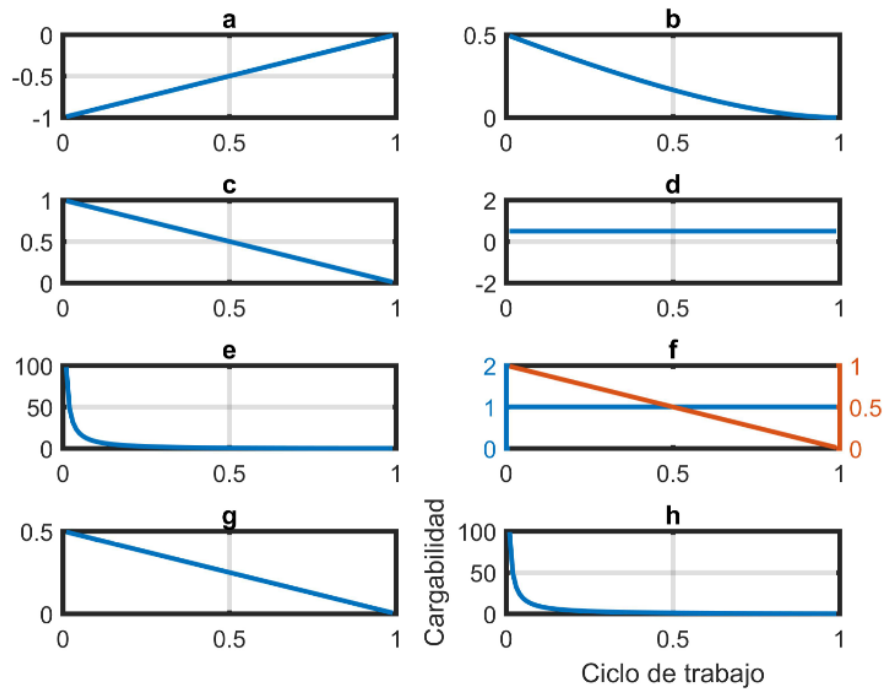


Fig. 2.44 Cargabilidad de convertidores buck-boost

Fig. 2.45. Cargabilidad de convertidores buck-boost. **(a)** Convertidor de un interruptor clásico, acoplamiento magnético tipo 1, ZVT tipo, aislado tipo 1. **(b)** un interruptor tipo 1. **(c)** dos interruptores tipo 1 y tipo 2, aislado tipo 2. **(d)** KY tipo 1 y tipo 2. **(e)** cuadrático tipo 1 y tipo 2. **(f)** cuatro interruptores tipo 1 y tipo 2, bidireccional tipo 1 y tipo 2, ZVT tipo 2. **(g)** un interruptor tipo 2. **(h)** acoplamiento magnético tipo 2.

2.11.3. Descripción de convertidores buck-boost

A continuación, en la Tabla 2.6. Se muestran las características que describen cada uno de los convertidores buk-boost. Cada uno de estos dispositivos presenta ventajas y unas desventajas, las cuales están asociadas a su forma constructiva y operacional.

Análisis comparativo de diferentes topologías de convertidores buck-boost utilizando MatLab

Convertidor n°	Figura	Familia	Nombre	Ventajas	Desventajas
1	1.5	Buck-Boost de un interruptor [2]	Clásico	<ul style="list-style-type: none"> Bajo número de elementos. Bajo peso. Menor tamaño y costo. Rápida respuesta transitoria 	<ul style="list-style-type: none"> Voltaje de salida negativo
2	2.1-2.4	Buck-Boost Un interruptor [3] [4]	Tipo 1	<ul style="list-style-type: none"> Baja cargabilidad. Respuesta transitoria rápida. Alta ganancia de voltaje ($G=9999$). Mayor capacidad de almacenamiento de energía. 	<ul style="list-style-type: none"> Alto número de elementos. Mayor costo, peso y tamaño.
			Tipo 2	<ul style="list-style-type: none"> Rápida respuesta transitoria. Mayor capacidad de almacenamiento de energía. 	<ul style="list-style-type: none"> Alto número de elementos. Mayor costo, peso y tamaño.
3	2.5-2.9	Buck-Boost con acoplamiento magnético [5] [6]	Tipo 1	<ul style="list-style-type: none"> Rápida respuesta transitoria. Mayor capacidad de almacenamiento de energía. 	<ul style="list-style-type: none"> Mayor costo
			Tipo 2	<ul style="list-style-type: none"> Mayor capacidad de almacenamiento de energía. Rápida respuesta transitoria. 	<ul style="list-style-type: none"> Alto número de elementos. Mayor costo, peso y tamaño.

Análisis comparativo de diferentes topologías de convertidores buck-boost utilizando MatLab

					<ul style="list-style-type: none"> Alta cargabilidad (Mayor al 100%)
4	2.11-2.14	Buck-Boost Dos interruptores [7] [8]	Tipo 1	<ul style="list-style-type: none"> Rápida respuesta transitoria. Salida de voltaje positiva. Compacto y liviano. 	<ul style="list-style-type: none"> Más elementos Más costoso.
			Tipo 2	<ul style="list-style-type: none"> Rápida respuesta transitoria. Compacto y liviano. 	<ul style="list-style-type: none"> Más elementos Más costoso.
5	2.15	Buck-Boost Cuatro interruptores [9] [10]	Tipo 1	<ul style="list-style-type: none"> Rápida respuesta transitoria. Económico, liviano y compacto. Capacidad de funcionamiento en modo buck y modo boost. 	<ul style="list-style-type: none"> Requiere de la Implementación de un esquema de control complejo.
5	2.18	Buck-Boost Cuatro interruptores [9] [10]	Tipo 2	<ul style="list-style-type: none"> Rápida respuesta transitoria. Económico, liviano y compacto. Capacidad de funcionamiento en modo buck y modo boost. 	<ul style="list-style-type: none"> Requiere de la Implementación de un esquema de control complejo.

Análisis comparativo de diferentes topologías de convertidores buck-boost utilizando MatLab

6	2.19-2.22	Buck-Boost KY [11] [12]	Tipo 1	<ul style="list-style-type: none"> Mayor capacidad de almacenamiento de energía. Cargabilidad constante en cualquier instante de tiempo. 	<ul style="list-style-type: none"> Alto número de elementos y mayor costo. Respuesta transitoria lenta.
			Tipo 2	<ul style="list-style-type: none"> Rápida respuesta transitoria. Cargabilidad constante en cualquier instante de tiempo. 	<ul style="list-style-type: none"> Requiere de la Implementación de un esquema de control complejo. Mayor número de elementos y mayor costo.
7	2.28	Buck-Boost Cuadrático [13] [14]	Tipo 1	<ul style="list-style-type: none"> Rápida respuesta transitoria. Alta ganancia de voltaje ($G=9801$). Mayor capacidad de almacenamiento de energía. 	<ul style="list-style-type: none"> Alto número de elementos, mayor costo y peso.
7	2.26	Buck-Boost Cuadrático [13] [14]	Tipo 2	<ul style="list-style-type: none"> Rápida respuesta transitoria. Alta ganancia de voltaje ($G=9801$). Mayor capacidad de almacenamiento de energía. 	<ul style="list-style-type: none"> Alto número de elementos, mayor costo y peso.

Análisis comparativo de diferentes topologías de convertidores buck-boost utilizando MatLab

8	2.28-2.35	Buck-Boost Bidireccional [15] [16]	Tipo 1	<ul style="list-style-type: none">• Rápida respuesta transitoria.• Capacidad de funcionamiento en modo buck y modo boost.• bajo número de elementos, menor costo y peso.	<ul style="list-style-type: none">• Alta cargabilidad en modo buck (100%).
			Tipo 2	<ul style="list-style-type: none">• Rápida respuesta transitoria.• Capacidad de funcionamiento en modo buck y modo boost.• Costo, tamaño y peso relativamente bajos.	<ul style="list-style-type: none">• Alta cargabilidad en modo buck (100%).
9	2.36-2.39	Buck-Boost ZVT [17] [15]	Tipo 1	<ul style="list-style-type: none">• Mayor capacidad de almacenamiento de energía.	<ul style="list-style-type: none">• Alto número de elementos, mayor tamaño y costo.• Respuesta transitoria lenta.
			Tipo 2	<ul style="list-style-type: none">• Mayor capacidad de almacenamiento de energía.• Rápida respuesta transitoria.	<ul style="list-style-type: none">• Alto número de elementos, mayor tamaño, peso y costo.

Análisis comparativo de diferentes topologías de convertidores buck-boost utilizando MatLab

				<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de funcionamiento en modo buck y modo boost. 	
10	2.40-2.43	Buck-Boost Aislado [18] [19]	Tipo 1	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de suministrar grandes voltajes a la salida. • Rápida respuesta transitoria. 	<ul style="list-style-type: none"> • Peso, tamaño y costo. • Requiere de la Implementación de un esquema de control complejo.
			Tipo 2	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de suministrar grandes voltajes a la salida. • voltajes a la salida. <p>Rápida respuesta transitoria.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Alto número de elementos, mayor tamaño, peso y costo. • Requiere de la Implementación de un esquema de control complejo.

Tabla 2.6 Características de convertidores buck-boost

Análisis comparativo de diferentes topologías de convertidores buck-boost utilizando MatLab

Familia	Tipo	Aplicación
buck-boost de un interruptor	1	<ul style="list-style-type: none"> Regulador de tensión en dispositivos electrónicos Vehículos eléctricos Microrredes
	2	<ul style="list-style-type: none"> Pilas de combustible Dispositivos electrónicos
buck-boost con acoplamiento magnético	1	<ul style="list-style-type: none"> Vehículos eléctricos
	2	<ul style="list-style-type: none"> Sistema de baterías Paneles solares
buck-boost de dos interruptores	1	<ul style="list-style-type: none"> Vehículos eléctricos Banco de baterías
	2	<ul style="list-style-type: none"> Vehículos eléctricos Pilas de combustible
buck-boost de cuatro interruptores	1	<ul style="list-style-type: none"> Sistema de baterías
	2	<ul style="list-style-type: none"> Vehículos eléctricos
buck-boost KY	1	<ul style="list-style-type: none"> Dispositivos electrónicos Vehículos eléctricos
	2	<ul style="list-style-type: none"> Dispositivos electrónicos
buck-boost cuadrático	1	<ul style="list-style-type: none"> Aplicaciones industriales
	2	<ul style="list-style-type: none"> Pilas de combustible Sistemas fotovoltaicos
buck-boost bidireccional	1	<ul style="list-style-type: none"> Vehículos eléctricos

Familia	Tipo	Aplicación
buck-boost bidireccional	2	<ul style="list-style-type: none"> • Carga y descarga de baterías
buck-boost ZVT	1	<ul style="list-style-type: none"> • Vehículos eléctricos
	2	<ul style="list-style-type: none"> • Banco de baterías • Vehículos eléctricos
buck-boost aislado	1	<ul style="list-style-type: none"> • Vehículos eléctricos
	2	<ul style="list-style-type: none"> • Energías renovables • Descarga de baterías

Tabla 2.7 Aplicaciones de las topologías de convertidores buck-boost

Capítulo 3

En este capítulo se presentan las características principales del software Matlab/Simulink, utilizado para el desarrollo de las simulaciones. Después, se muestran los circuitos de cada uno de los convertidores buck-boost con sus respectivos parámetros y luego las formas de onda obtenidas en los modos de operación buck y boost. Finalmente, se resumen en tablas los resultados de la simulación.

3. Simulaciones y comparaciones

3.1 Software

Matlab es un software especializado que se adapta a las necesidades de los procesos de desarrollo, investigación y análisis, en las ingenierías y en la ciencia. Matlab es altamente utilizado en el área de la ingeniería eléctrica, gracias a su versatilidad, flexibilidad y lenguaje de programación sencillo. Esta herramienta de cómputo altamente intuitiva cuenta con un ambiente de simulación por bloques llamado Simulink que permite desarrollar algoritmos, realizar simulaciones, analizar y visualizar resultados. En Fig. 3.1 se muestra la interfaz principal de Simulink.

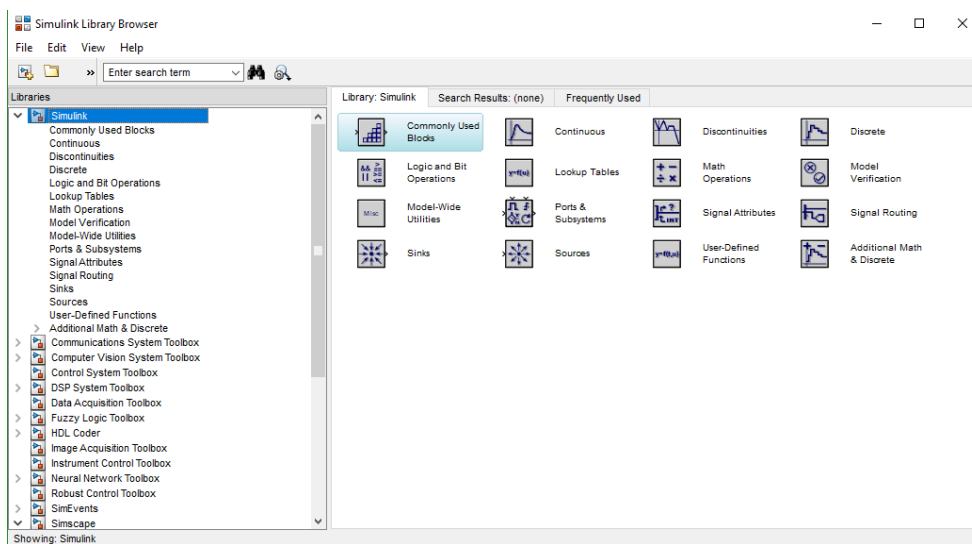


Fig. 3.1 Interfaz principal de Simulink

Simulink cuenta con una serie de librerías, que permiten ampliar sus capacidades. La librería **SimPowerSystem** contiene componentes y herramientas de análisis para modelar y simular sistemas

Análisis comparativo de diferentes topologías de convertidores buck-boost utilizando MatLab

eléctricos de potencia. Esta librería está compuesta por dos sub-librerías: Simscape Components y Specialized Tecnology.

Specialized Tecnology despliega otras librerías como se muestra en Fig. 3.2

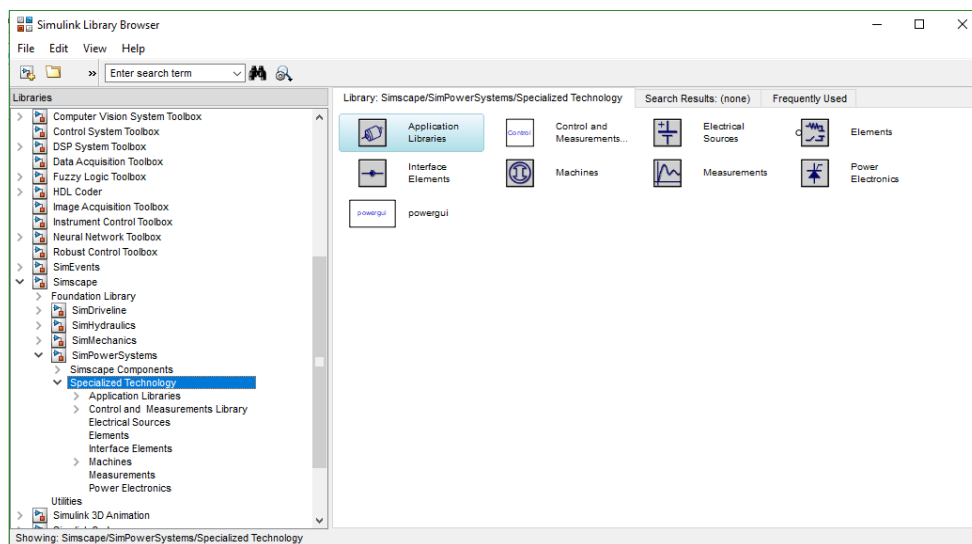


Fig. 3.2 Sub-librerías de Specialized Tecnology

Algunas de las librerías que se despliegan de Specialized Tecnology son:

ElectricalSources: Esta sub-librería contiene fuentes de corriente y voltaje: DC, AC, monofásicas y trifásicas. Además tiene baterías y fuentes controladas.

Elements: Contiene interruptores, transformadores, inductores acoplados, y elementos pasivos para modelar impedancias y cargas principalmente.

Measurements: En esta librería se encuentran elementos para medición de voltajes y corrientes en circuitos monofásicos y trifásicos.

Power Electronics: Contiene elementos electrónicos como diodos, mosfets, tiristores, IGBTs, GTOs, entre otros.

Powergui: Este bloque es bastante importante ya que debe ir en toda simulación, si este bloque no se incluye, la simulación no corre puesto que en este bloque está definida la configuración del modo de simulación, ya sea continuo, discreto o análisis fasorial.

A continuación, en Fig. 3.3. Se muestra el circuito del convertidor buck-boost básico implementado en el ambiente Simulink de Matlab.

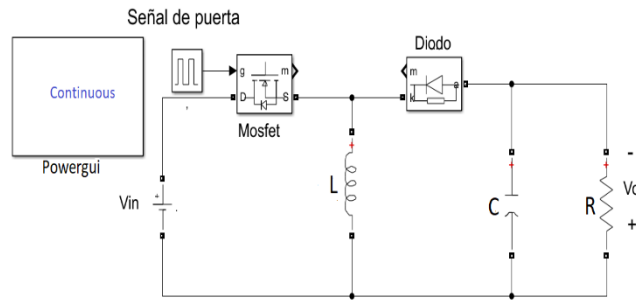


Fig. 3.3 Circuito buck-boost clásico simulado en Simulink.

Los bloques necesarios en la implementación y la librería de la cual provienen se muestran en la tabla siguiente:

N°	ELEMENTO	LIBRERÍA
1	Powergui	Specialized Tecnology
2	Vin (fuente DC)	Specialized Tecnology/Electrical Sources
3	Mosfet	Specialized Tecnology/Power Electronics
4	Diodo	Specialized Tecnology/Power Electronics
5	Elementos pasivos (R L C)	Specialized Tecnology/Elements
6	Señal de puerta (tren de pulsos)	Simulink/Sources

Tabla 3.1 Elementos y librerías necesarias para la implementación en Simulink/Matlab de los convertidores buck-boost.

3.2 Criterios de simulación

Este apartado contiene los criterios considerados para el desarrollo de las simulaciones. Algunos de los criterios considerados son: tiempos de simulación, ciclos de trabajo, valores de referencias, respuestas del convertidor.

El tiempo de simulación se definió de 50 ms, mostrando la respuesta del convertidor en modo buck y modo boost en la misma gráfica. En cada modo el tiempo es de 25 ms. Estos tiempos permiten visualizar el establecimiento de la forma de onda de cada convertidor. Sin embargo un tiempo de 25 ms no es suficiente para el reestablecimiento de las formas de onda de los convertidores, un interruptor tipo 1, los dos convertidores KY y el convertidor ZVT tipo 1 descritos en el capítulo 2, puesto que sus respuestas transitorias son más lentas en comparación con los otros convertidores buck-boost, por tanto se hace necesario definir un tiempo de simulación de 50 ms en modo buck y 50 ms en modo boost, en este tiempo

Análisis comparativo de diferentes topologías de convertidores buck-boost utilizando MatLab

es posible observar cuando el circuito alcanza su referencia, ya sea trabajando como reductor o como elevador.

En cuanto al ciclo útil de trabajo D , se tomaron valores acorde a los modos de funcionamiento. Para modo buck $D = 40\%$, y para modo boost $D = 60\%$. También es importante mencionar que el voltaje de entrada V_{in} de cada uno de los convertidores tiene un valor unificado de 48 voltios. El voltaje de salida depende de la ganancia de cada convertidor.

Los valores de los elementos pasivos que conforman las topologías buck-boost (resistencia, inductancia y condensador), son diferentes para cada convertidor. Estos valores determinan la respuesta transitoria y de estado estacionario, y son resultado de la etapa de diseño.

Los elementos de electrónica de potencia y de circuitos se consideran como elementos ideales.

Cabe aclarar que el objetivo de este documento es realizar un análisis comparativo de diferentes topologías buck-boost en estado estacionario bajo condiciones ideales. No se tiene en cuenta el diseño del convertidor ni acciones de control en lazo cerrado. Se analiza la respuesta del convertidor en lazo abierto.

3.2.1 Definición de parámetros

A continuación se presenta la familia de convertidores buck-boost con sus respectivos parámetros de simulación y formas de onda, que corresponden al voltaje de salida en cada circuito.

3.2.1.1 Convertidor buck-boost clásico

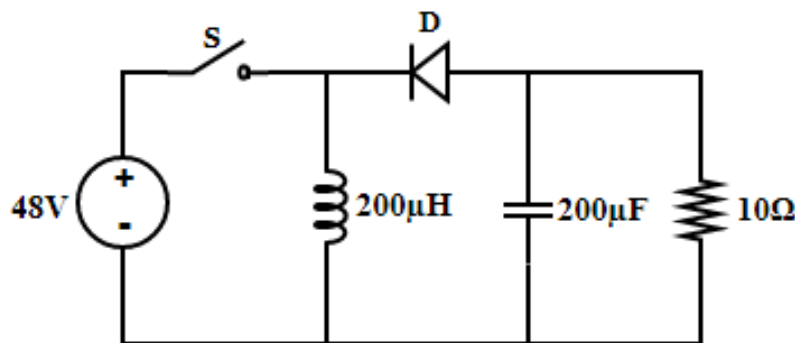


Fig. 3.4 Convertidor buck-boost clásico

3.2.1.2 Familia de un interruptor

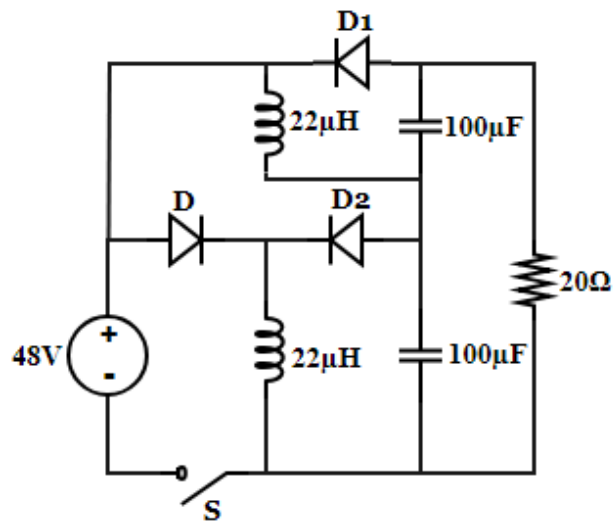


Fig. 3.5 Convertidor buck-boost de un interruptor tipo 1

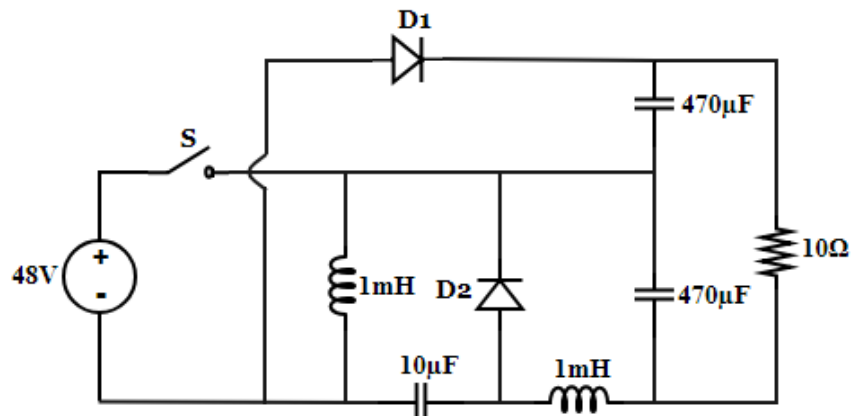


Fig. 3.6 Convertidor buck-boost de un interruptor tipo 2

3.2.1.3 Familia de convertidores buck-boost con acoplamiento magnético

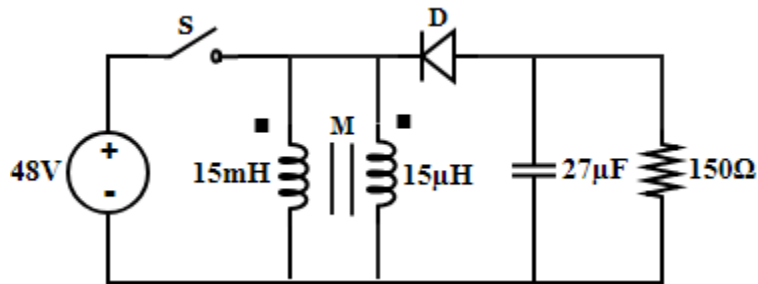


Fig. 3.7 Convertidor buck-boost con acoplamiento magnético tipo 1

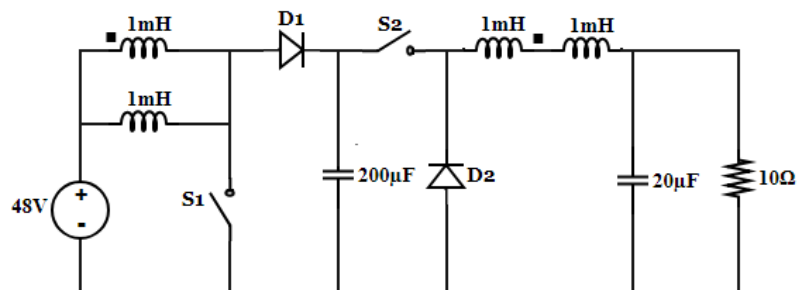


Fig. 3.8 Convertidor buck-boost con acoplamiento magnético tipo 2

3.2.1.4 Familia de convertidores buck-boost de dos interruptores

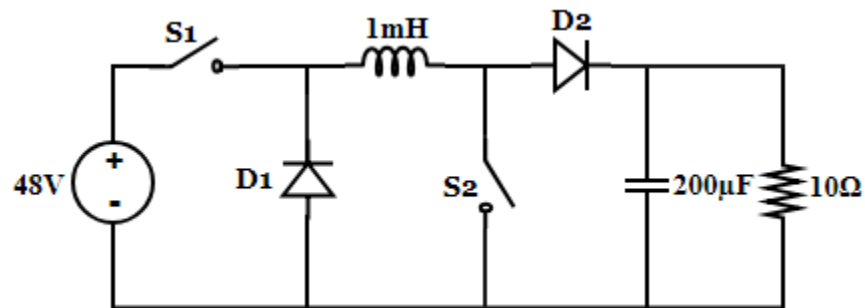


Fig. 3.9 Convertidor buck-boost de dos interruptores tipo 1.

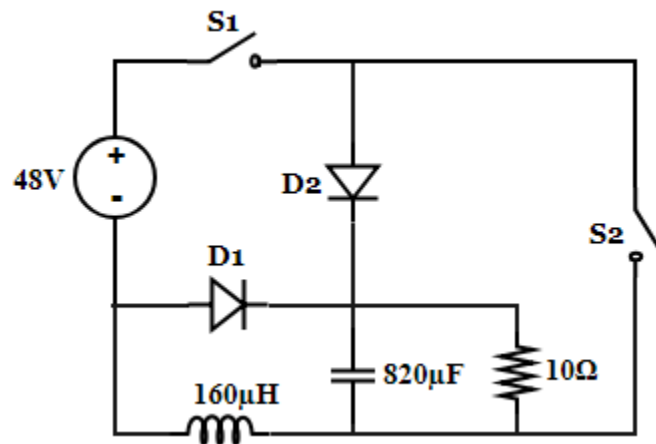


Fig. 3.10 Convertidor buck-boost de dos interruptores tipo 2.

3.2.1.5 Familia de convertidores buck-boost de cuatro interruptores

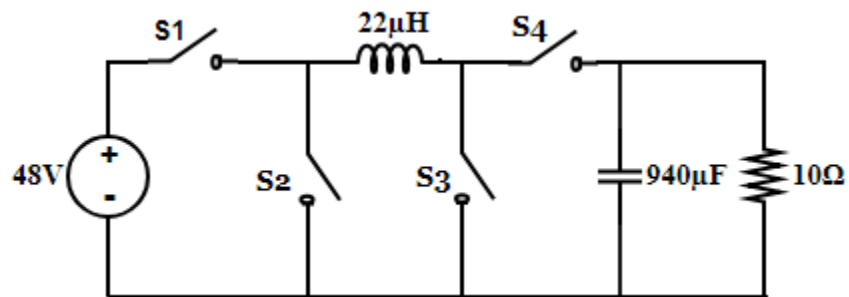


Fig. 3.11 Convertidor buck-boost de cuatro interruptores tipo 1

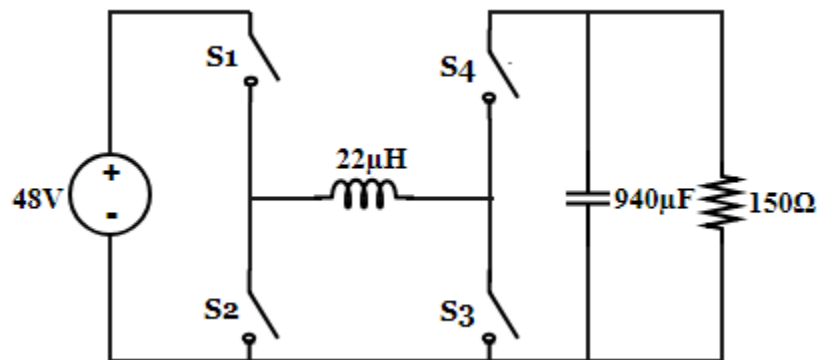


Fig. 3.12 Convertidor buck-boost de cuatro interruptores tipo 2

3.2.1.6 Familia de convertidores buck-boost KY

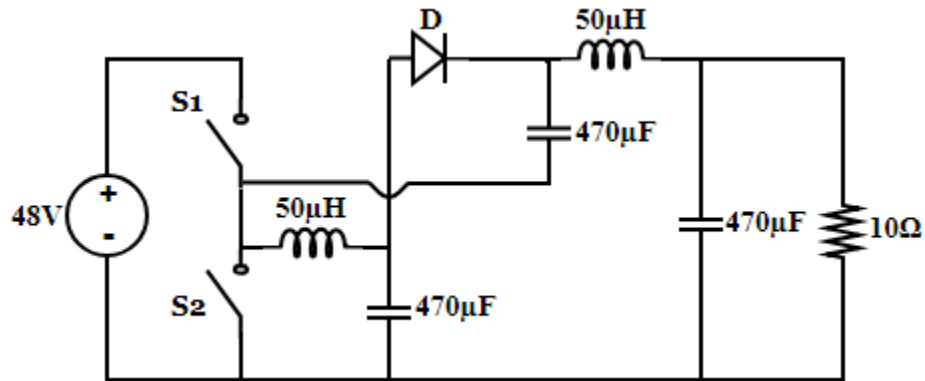


Fig. 3.13 Convertidor buck-boost KY tipo 1

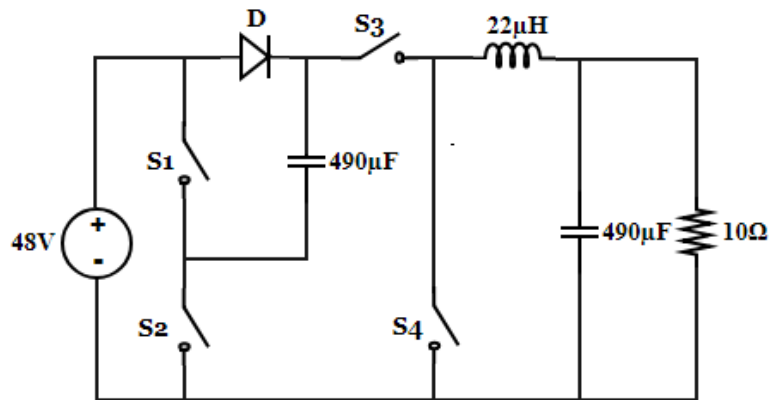


Fig. 3.14 Convertidor buck-boost KY tipo 2

3.2.1.7 Familia de convertidores buck-boost cuadráticos

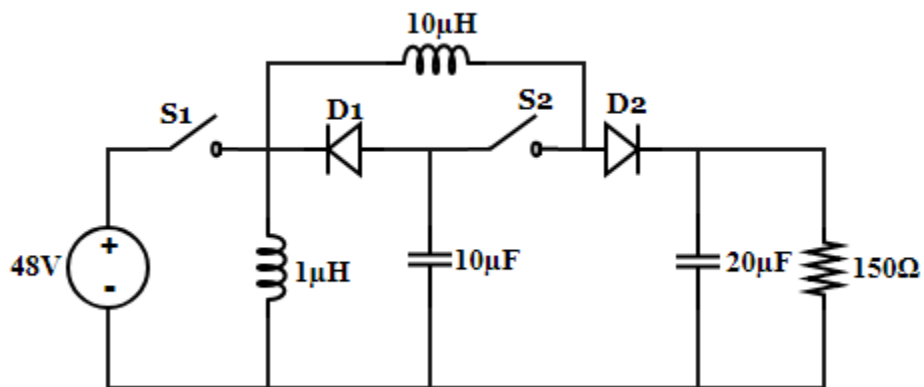


Fig. 3.15 Convertidor buck-boost cuadrático tipo 1

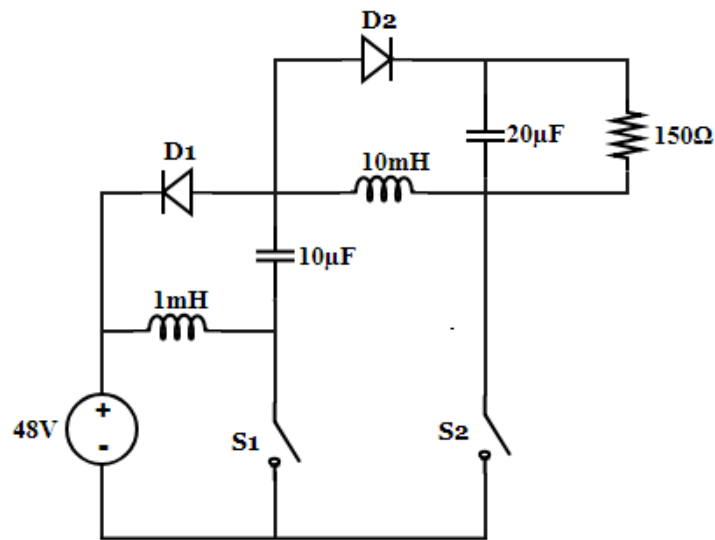


Fig. 3.16 Convertidor buck-boost cuadrático tipo 2

3.2.1.8 Familia de convertidores buck-boost bidireccionales

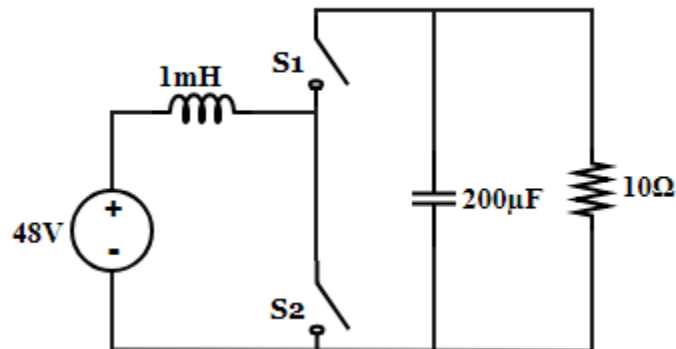


Fig. 3.17 Convertidor buck-boost bidireccional tipo 1 (modo boost)

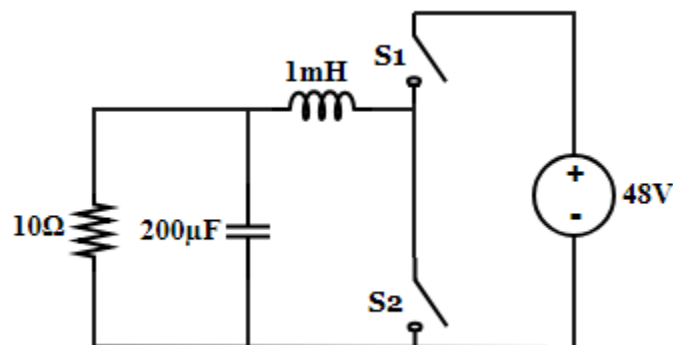


Fig. 3.18 Convertidor buck-boost bidireccional tipo 1 (modo buck)

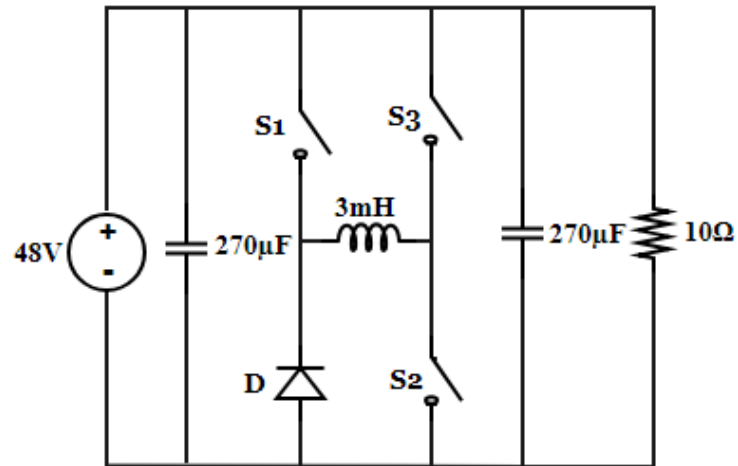


Fig. 3.19 Convertidor buck-boost bidireccional tipo 2 (modo boost)

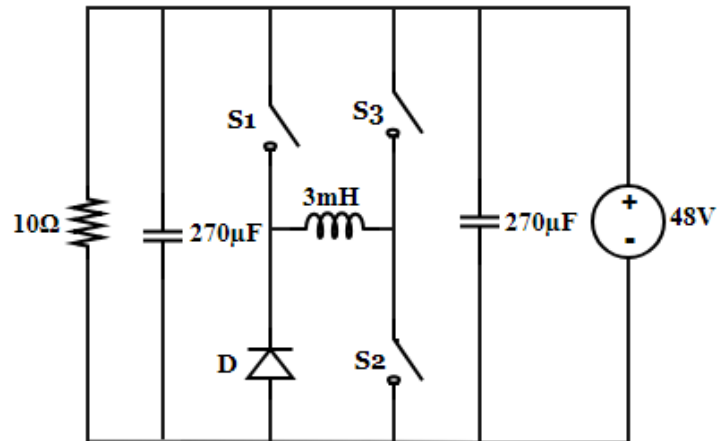


Fig. 3.20 Convertidor buck-boost bidireccional tipo 2 (modo buck)

3.2.1.9 Familia de convertidores buck-boost ZVT

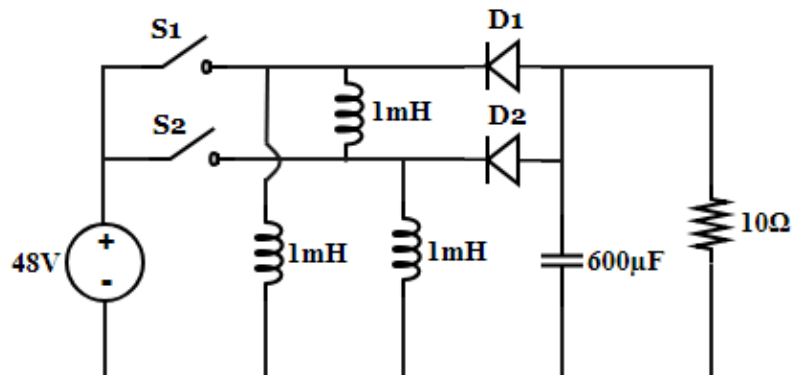


Fig. 3.21 Convertidor buck-boost ZVT tipo 1

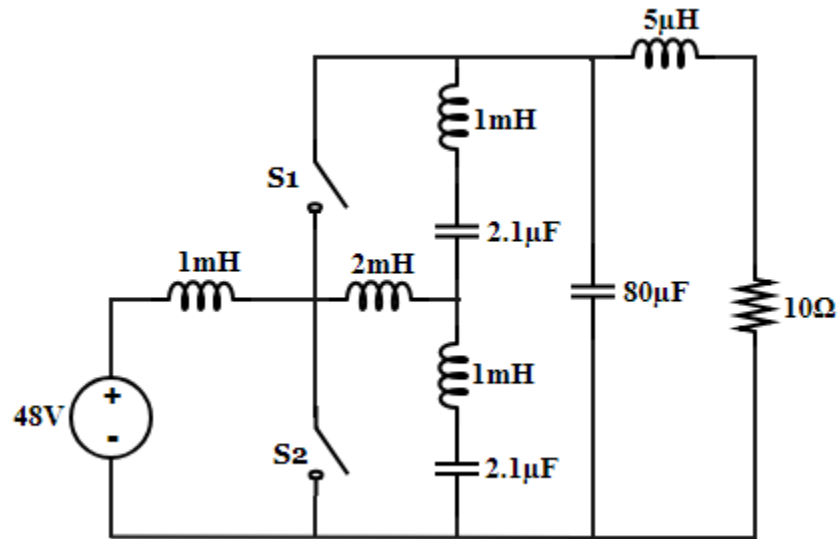


Fig. 3.22 Convertidor buck-boost ZVT tipo 2

3.2.1.10 Familia de convertidores aislados

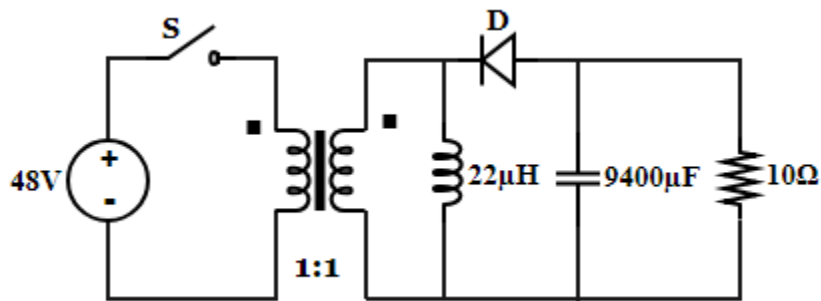


Fig. 3.23 Convertidor buck-boost con aislamiento tipo 1

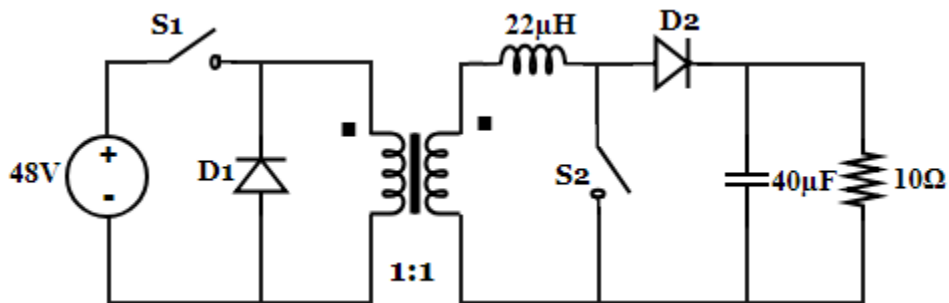


Fig. 3.24 Convertidor buck-boost con aislamiento tipo 2

3.2.2 Resumen de parámetros de simulación

En la Tabla 3.2. Se especifican los valores de los parámetros con los cuales fueron simulados cada uno de los convertidores.

Análisis comparativo de diferentes topologías de convertidores buck-boost utilizando MatLab

Figura	Familia	Nombre	L1(μ H)	L2(μ H)	L3(μ H)	L4(μ H)	L5(μ H)	C1(μ F)	C2(μ F)	C3(μ F)	R(Ω)
1	Buck-Boost de un interruptor [2]	Clásico	200	—	—	—	—	200	—	—	10
2	Buck-Boost Un interruptor [3] [4]	Tipo 1	22	22	—	—	—	100	100	—	10
		Tipo 2	1000	1000	—	—	—	470	470	10	10
3	Buck-Boost con acoplamiento magnético [5] [6]	Tipo 1	15	15	—	—	—	27	—	—	150
		Tipo 2	1000	1000	1000	1000	—	200	20	—	10
Figura	Familia	Nombre	L1(μ H)	L2(μ H)	L3(μ H)	L4(μ H)	L5(μ H)	C1(μ F)	C2(μ F)	C3(μ F)	R(Ω)
4	Buck-Boost Dos interruptores [7] [8]	Tipo 1	1000	—	—	—	—	200	—	—	10
		Tipo 2	160	—	—	—	—	820	—	—	10
5	Buck-Boost Cuatro interruptores [9] [10]	Tipo 1	22	—	—	—	—	940	—	—	10
		Tipo 2	22	—	—	—	—	940	—	—	150
6	Buck-Boost KY [11] [12]	Tipo 1	50	50	—	—	—	470	470	470	10
		Tipo 2	22	—	—	—	—	490	490	—	10
7	Buck-Boost Cuadrático [13] [14]	Tipo 1	1000	10	—	—	—	10	20	—	150
		Tipo 2	1000	10000	—	—	—	10	20	—	150
8	Buck-Boost Bidireccional [15] [16]	Tipo 1	1000	—	—	—	—	200	—	—	10
		Tipo 2	3000	—	—	—	—	270	270	—	10
9	Buck-Boost ZVT [17] [15]	Tipo 1	1000	1000	1000	—	—	600	—	—	10
		Tipo 2	1000	2000	1000	1000	5	2.1	2.1	80	10

10	Buck-Boost Aislado [18] [19]	Tipo 1	22	—	—	—	—	9400	—	—	10
		Tipo 2	22	—	—	—	—	40	—	—	10

Tabla 3.2 Resumen de parámetros de simulación

3.3 Resultados de simulación

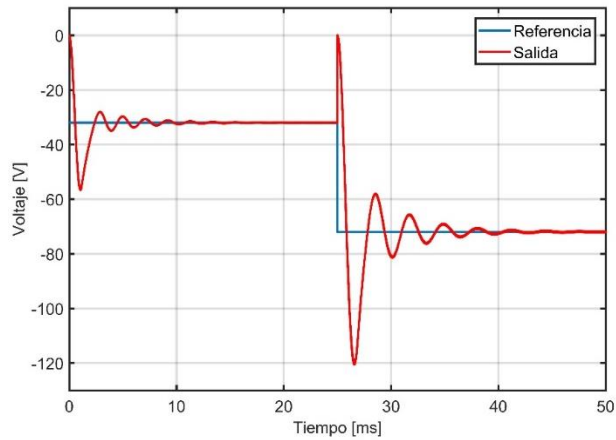


Fig. 3.25 Voltaje en la carga del convertidor buck-boost clásico

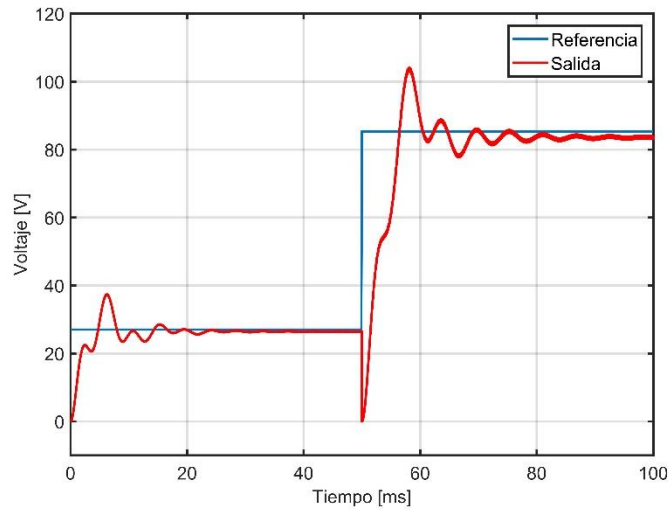


Fig. 3.26 Voltaje en la carga del convertidor buck-boost de un interruptor tipo 1

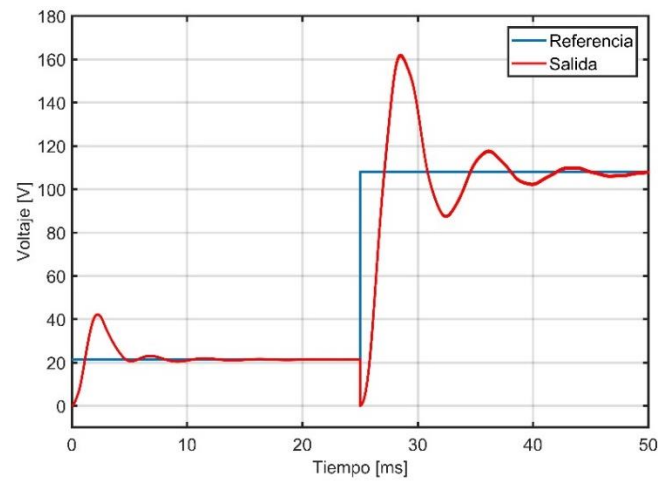


Fig. 3.27 Voltaje en la carga del convertidor buck-boost de un interruptor tipo 2

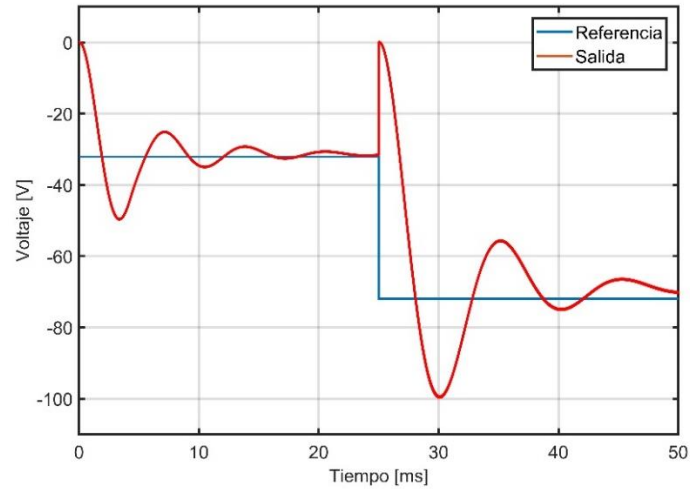


Fig. 3.28 . Voltaje en la carga del convertidor buck-boost con acoplamiento magnético tipo 1

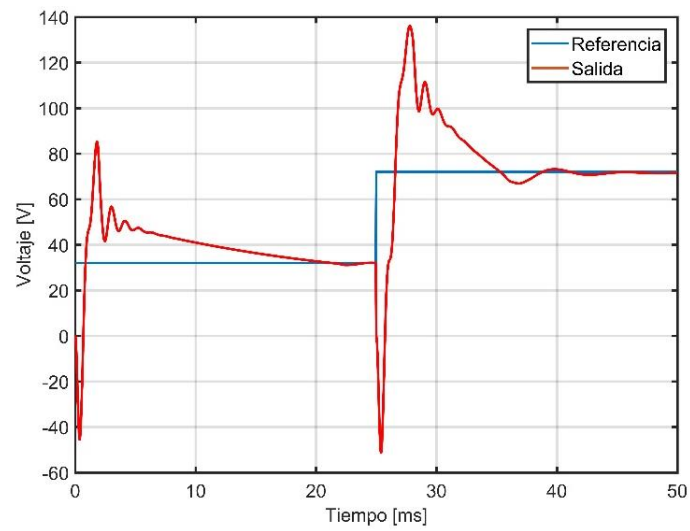


Fig. 3.29 Voltaje en la carga del convertidor buck-boost con acoplamiento magnético tipo 2

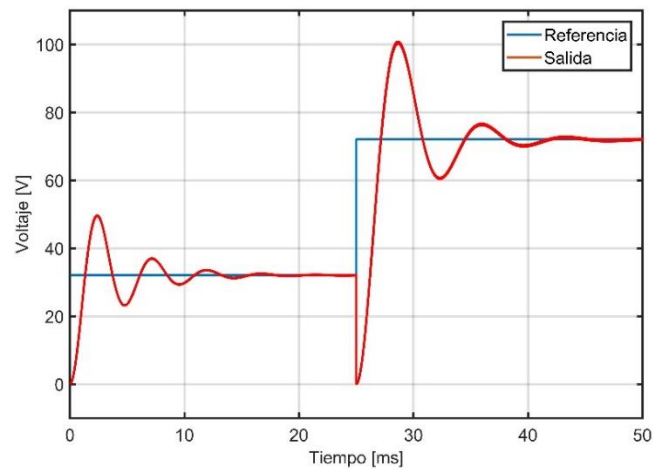


Fig. 3.30 Voltaje en la carga del convertidor buck-boost de dos interruptores tipo 1

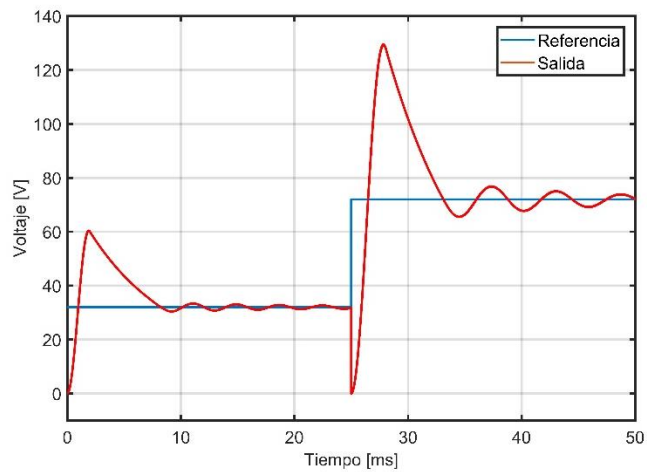


Fig. 3.31 Voltaje en la carga del convertidor buck-boost de dos interruptores tipo 2

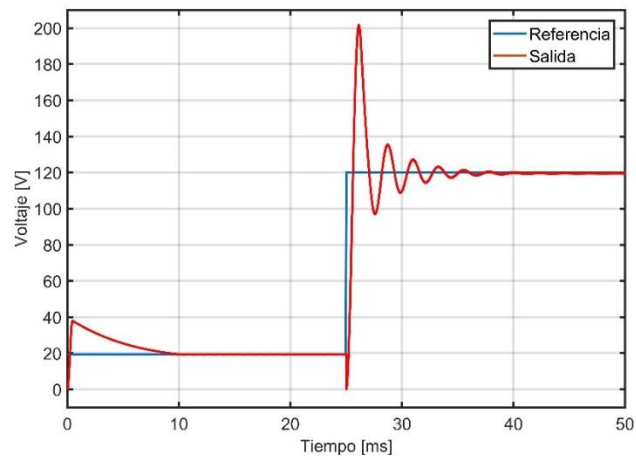


Fig. 3.32 Voltaje en la carga del convertidor buck-boost de cuatro interruptores tipo 1

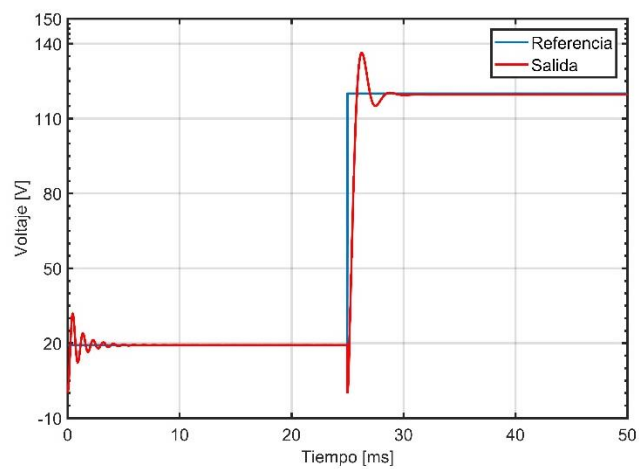


Fig. 3.33 Voltaje en la carga del convertidor buck-boost de cuatro interruptores tipo 2

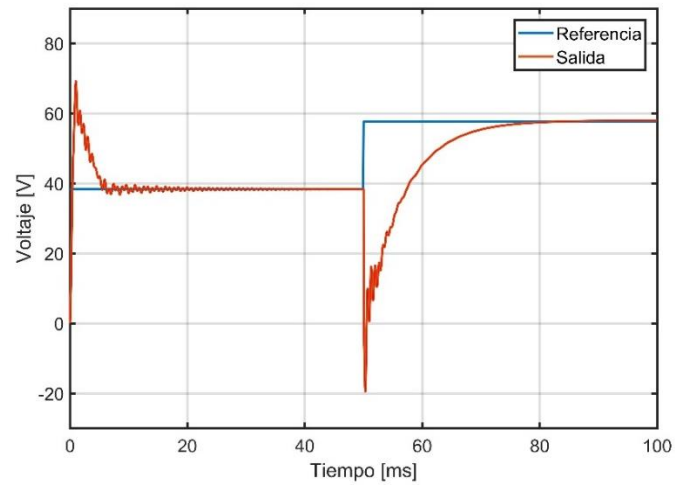


Fig. 3.34 Voltaje en la carga del convertidor buck-boost KY tipo 1

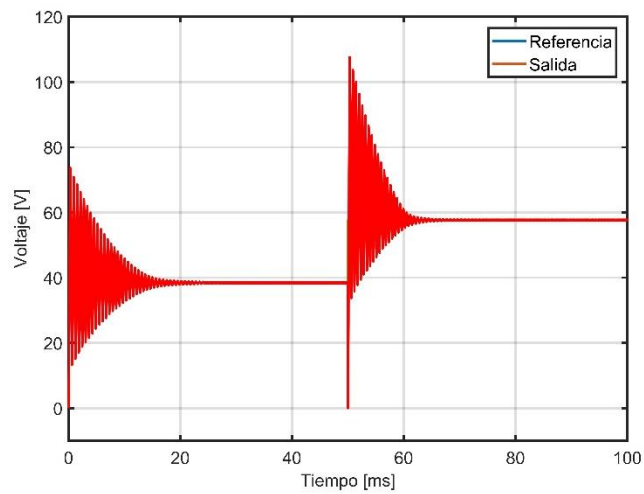


Fig. 3.35 Voltaje en la carga del convertidor buck-boost KY tipo 2

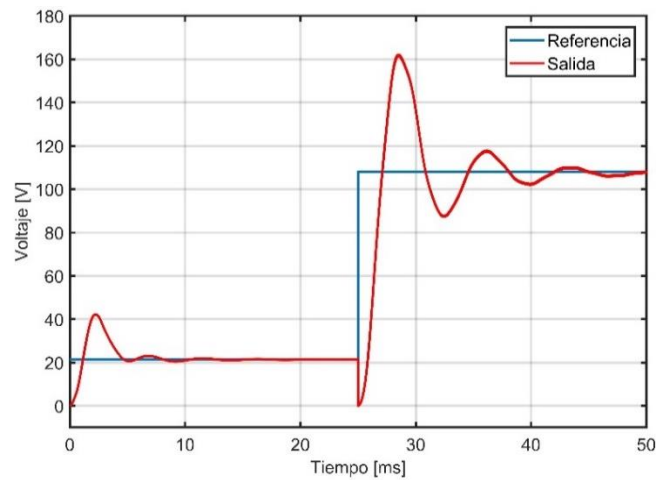


Fig. 3.36 Voltaje en la carga del convertidor buck-boost cuadrático tipo 1

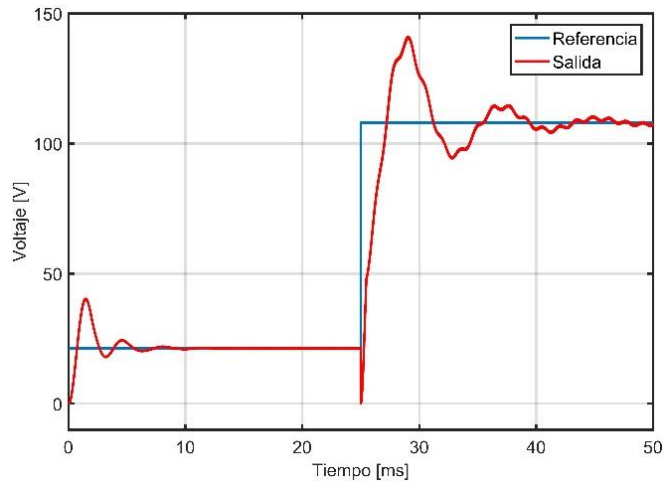


Fig. 3.37 Voltaje en la carga del convertidor buck-boost cuadrático tipo 2

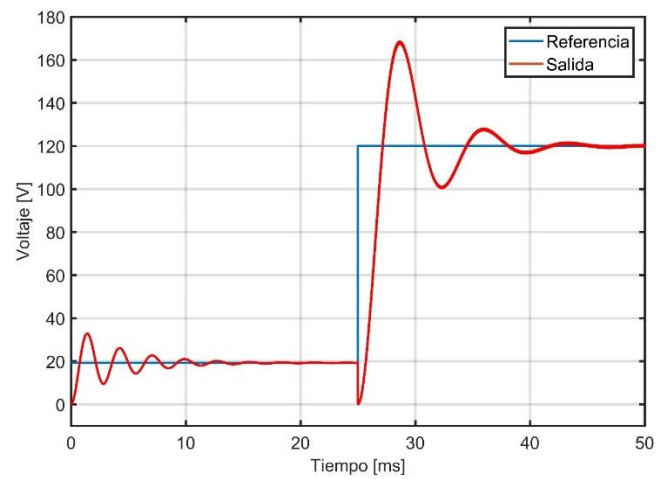


Fig. 3.38 Voltaje en la carga del convertidor buck-boost bidireccional tipo 1

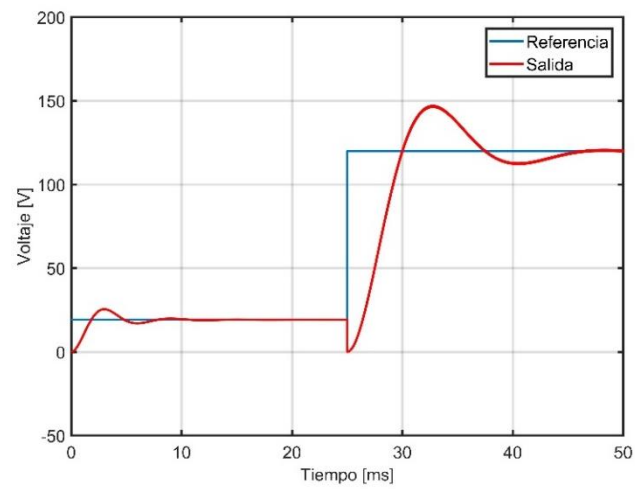


Fig. 3.39 Voltaje en la carga del convertidor buck-boost bidireccional tipo 2

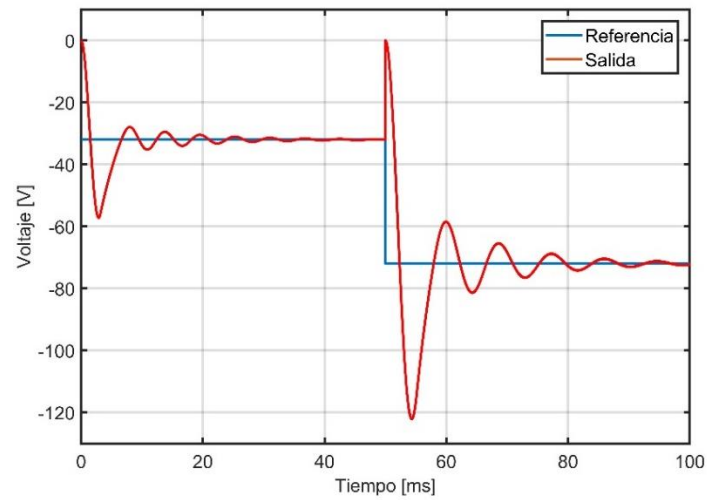


Fig. 3.40 Voltaje en la carga del convertidor buck-boost ZVT tipo 1

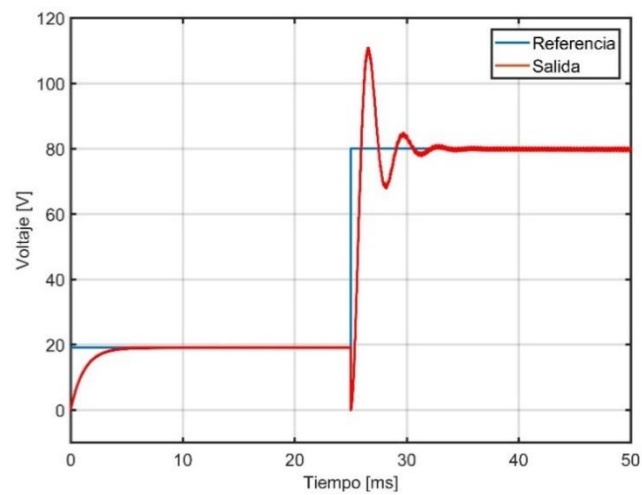


Fig. 3.41 Voltaje en la carga del convertidor buck-boost ZVT tipo 2

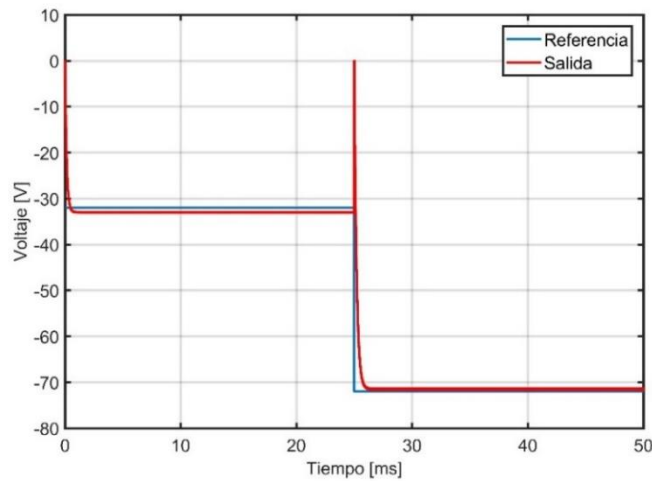


Fig. 3.42 Voltaje en la carga del convertidor buck-boost aislado tipo 1

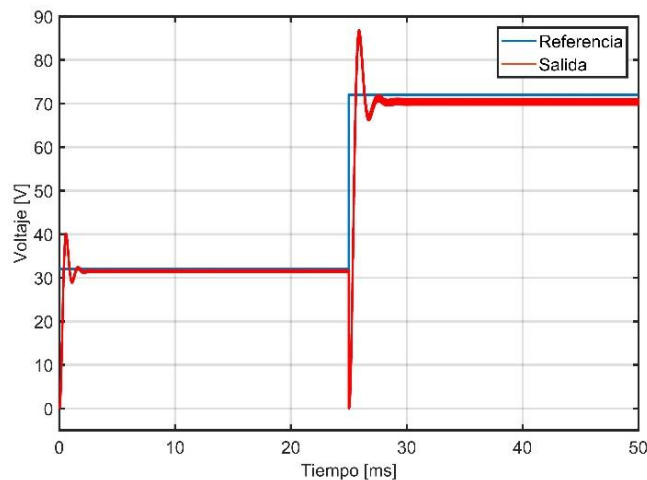


Fig. 3.43 Voltaje en la carga del convertidor buck-boost aislado tipo 2

Conclusiones

- Existe gran variedad de convertidores buck-boost en la literatura especializada. Los convertidores buck-boost son utilizados en diferentes aplicaciones que son de gran importancia en la actualidad, como el caso de los vehículos eléctricos, carga y descarga de baterías, redes HVDC, y dispositivos electrónicos. En este trabajo de investigación se estudió en lazo abierto diferentes convertidores buck-boost presentes en la literatura, analizando dos características principales: ganancia de voltaje y cargabilidad. En total se analizaron 18 topologías clasificadas en 9 familias, que son una selección de las topologías halladas en la revisión del estado del arte.

Análisis comparativo de diferentes topologías de convertidores buck-boost utilizando MatLab

- En la literatura se encuentran principalmente dos formas de clasificación de convertidores buck-boost. De acuerdo al orden del circuito, se pueden clasificar como convertidores de segundo o de cuarto orden. Y según el número de interruptores independientes, se pueden clasificar como mono-variable o SISO (una entrada, una salida), y multivariable o MIMO (múltiples entradas, múltiples salidas). En esta investigación se presentó una clasificación propia agrupando los convertidores en nueve familias, teniendo en cuenta características como: número de interruptores, dirección del flujo de potencia, aislamiento, acoplamiento magnético, elementos almacenadores de energía, ganancia de voltaje, características constructivas y operacionales. Así, se conformaron las siguientes familias: Un interruptor tipo 1 y tipo 2, acoplamiento magnético tipo 1 y tipo 2, dos interruptores tipo 1 y tipo 2, cuatro interruptores tipo 1 y tipo 2, KY tipo 1 y tipo 2, cuadráticos tipo 1 y tipo 2, bidireccional tipo 1 y tipo 2, ZVT tipo 1 y tipo 2, y aislados tipo 1 y tipo 2.
- Cada familia de convertidores buck-boost presenta características propias para el desarrollo de ciertas aplicaciones. El caso de vehículos eléctricos y sistemas de baterías son aplicaciones comunes a todas las familias, pero la familia de mayor interés en estas áreas es la bidireccional. Existen otras aplicaciones que son particulares de cada convertidor. Por ejemplo, en aplicaciones de sistemas fotovoltaicos es recomendable utilizar el convertidor buck-boost con acoplamiento magnético tipo 2 y la familia de convertidores cuadráticos. Mientras que en las aplicaciones relacionadas con dispositivos electrónicos, es común utilizar la familia de un interruptor y la familia KY.
- En este proyecto de investigación se realizó un análisis comparativo de diferentes topologías buck-boost en estado estacionario bajo condiciones ideales y en lazo abierto. Las variables de comparación consideradas fueron ganancia de voltaje y cargabilidad. Se utilizó el software Matlab/Simulink.
- Mediante el análisis de las topologías y resultados de simulación, se evidencia que algunos convertidores presentan altas ganancias de voltaje, siendo el convertidor Buck-Boost de un solo interruptor tipo 1 el que presenta la mayor ganancia, seguido por las familias de convertidores cuadráticos, bidireccionales y ZVT tipo 2. Otras familias por el contrario, presentan ganancias que no son tan elevadas y que numéricamente son equivalentes, como es el caso de los convertidores acoplados, de dos interruptores, cuatro interruptores, aislados, ZVT tipo 1 y un interruptor tipo 2. Por último está la familia KY que presenta la ganancia de voltaje más baja.
- La cargabilidad de los convertidores buck-boost depende de dos factores fundamentales: ganancia de voltaje y número de inductores. La cargabilidad es inversamente proporcional al ciclo de trabajo y al número de inductores en el convertidor. La topología buck-boost acoplado tipo 2 es la que presenta la mayor cargabilidad. También están aquellos convertidores que tienen altas

Análisis comparativo de diferentes topologías de convertidores buck-boost utilizando MatLab

cargabilidades, pero su cargabilidad no depende del ciclo de trabajo. Estos convertidores pertenecen a la familia bidireccional, de cuatro interruptores tipo 1, y ZVT tipo 2. Las familias cuyo ciclo de trabajo influye en una alta cargabilidad son: convertidores de dos interruptores, aislados, cuadráticos, cuatro interruptores tipo 2, y el ZVT tipo 1. Finalmente, está el convertidor de un solo interruptor, el cual presenta la cargabilidad más baja. Un caso particular es la familia KY, la cual presenta cargabilidad constante del 50%. Este valor es independiente del ciclo de trabajo y de la carga.

- En aplicaciones que demanden altos voltajes de salida, es aconsejable utilizar el convertidor buck-boost de un solo interruptor tipo 1, ya que este posee la mayor ganancia de voltaje y no necesita de ciclos de trabajo muy altos. Por ejemplo, en modo boost se trabaja con ciclos de trabajo no mayores al 65% para alcanzar altos voltajes de salida. Esta topología presenta una cargabilidad muy baja y gran capacidad de almacenamiento de energía. Sin embargo, presenta alto número de elementos, aumentando el tamaño y el peso del convertidor.
- Para aplicaciones industriales que requieran de altas o bajas ganancias de voltajes, la mejor opción es la familia de convertidores cuadráticos. Estos convertidores presentan alta capacidad de almacenamiento de energía, pero también tienen gran número de elementos.
- La familia de los bidireccionales tienen como gran ventaja que pueden operar tanto en modo buck, como en modo boost de manera independiente durante un ciclo de trabajo completo. Estos convertidores son livianos y económicos. Su principal desventaja, es que presentan una cargabilidad del 100% en cualquier instante cuando operan en modo buck.
- La familia de los convertidores aislados tienden a ser pesados debido al transformador que es el elemento que los caracteriza. Además, su ganancia de voltaje es función de la relación de transformación. Los convertidores aislados entregan altos voltajes a la salida.
- Los convertidores que presentan un alto número de interruptores de potencia requieren de esquemas de control complejos, como es el caso de los convertidores de la familia KY, familia de cuatro interruptores y el convertidor bidireccional tipo 2.

Trabajos futuros

- Realizar un análisis comparativo de convertidores buck-boost utilizando una técnica clásica de control y analizar variables de interés como respuesta en frecuencia y tiempo de establecimiento.

- A una misma topología buck-boost aplicarle diferentes técnicas de control obtenidas en la literatura a partir de la revisión del estado del arte.
- Profundizar en el estudio de topologías de convertidores buck-boost bidireccionales y en sus técnicas de control.

Referencias

- [1] Mohan, Undeland y Robbins, J. Wiley & Sons "Power Electronics: Converters, Applications and Design" 2ª Ed, Nueva York, 1995.
- [2] D. W. Hart. "Electrónica de potencia". Madrid: Pearson educacion.S.A. 2001.
- [3] S. Kumar y P. Thakura, "Microcontroller based DC-DC Cascode Buck-Boost Converter", en *Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics (AEEICB), 2017 Third International Conference on*, 2017, pp. 289–294.
- [4] H. Ardi, A. Farakhor, y M. R. Banaei, "Analysis and implementation of a new single-switch buck–boost DC/DC converter", *IET Power Electron.*, vol. 7, n.º 7, pp. 1906-1914, jul. 2014.
- [5] Yong Zhang, Wei Wei, Jiacheng Tang, Zeyan Lv, "An Improved Buck-Boost Converter Based on Pulse Sequence Control", *IEEE Trans. Ind. Electron*, 2017.
- [6] C. restrepo, J. Calvente, A. cid-Pastor, A.E. Aroudi, R. Giral, "A Noninverting Buck–Boost DC–DC Switching Converter With High Efficiency and Wide Bandwidth", *IEEE Trans. Power Electron*, vol. 26, no. 9, september 2011
- [7] J.Chen, D. Maksimović, r. Erickson, "Buck-Boost PWM Converters Having Two Independently Controlled Switches" *IEEE Trans. Ind. Electron*, 0-7803-7067-8/01/\$10.00 02001 IEEE
- [8] H.-S. Son, J.-K. Kim, J.-B. Lee, S.-S. Moon, J.-H. Park, y S.-H. Lee, "A New Buck–Boost Converter With Low-Voltage Stress and Reduced Conducting Components", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, n.º 9, pp. 7030-7038, sep. 2017.
- [9] Xiaoyong Ren, Xinbo Ruan, Hai Qian, Mingqiu Li, y Qianhong Chen, "Three-Mode Dual-Frequency Two-Edge Modulation Scheme for Four-Switch Buck–Boost Converter", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, n.º 2, pp. 499-509, feb. 2009.
- [10] G. R. Bossio, C. H. De Angelo, G. O. Garcia, "Implementación de un convertidor reductor-elevador bidireccional para vehículos eléctricos ", ResearchGate, Universidad Nacional de Rio Cuarto. January 2002.
- [11] K. I. Hwu y T. J. Peng, "A Novel Buck–Boost Converter Combining KY and Buck Converters", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, n.º 5, pp. 2236-2241, may 2012.

- [12] K. I. Hwu y Y. T. Yau, "Two Types of KY Buck–Boost Converters", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, n.º 8, pp. 2970-2980, ago. 2009.
- [13] S. Miao, F. Wang, y X. Ma, "A New Transformerless Buck–Boost Converter With Positive Output Voltage", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, n.º 5, pp. 2965-2975, may 2016.
- [14] A. Mostaan, S. A. Gorji, M. Soltani, y M. Ektesabi, "A novel quadratic buck-boost DC-DC converter without floating gate-driver", en *Power Electronics Conference (SPEC), IEEE Annual Southern*, 2016, pp. 1–5.
- [15] S. M. Venkit y P. C. Athira, "Solar powered ZCS bidirectional buck-boost converter used in battery energy storage systems", en *Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT), 2016 International Conference on*, 2016, pp. 1–5.
- [16] M. gonzález, A. Alzate, "Diseño estatico de un convertidor DC/DC redactor-elevador bidireccional", *Revista Tecnura Volumen 14 Numero 26* paginas 7 - 14 Enero - Junio de 2010
- [17] E. M. Amiri, J. S. Moghani, G. B. Gharehpetian, y S. H. Yazdi, "Novel two stage buck-boost converter with zero-voltage transition operation", en *Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC), 2014 5th*, 2014, pp. 143–147.
- [18] U. Oviedo, “ Convertidores CC/CC Sistemas Electrónicos de Alimentación 5º Curso. Ingeniería de Telecomunicación”, Universidad de Oviedo, ATE Univ. de Oviedo SISAL001.00. 2010.
- [19] Y. Lu, H. Wu, K. Sun, y Y. Xing, "A Family of Isolated Buck-Boost Converters Based on Semiactive Rectifiers for High- Output Voltage Applications", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, n.º 9, pp. 6327-6340, sep. 2016.